

Le Tsunami du 26 décembre 2004 : un phénomène hydraulique d'ampleur internationale. Premiers constats

The 26 December 2004 Tsunami: a Hydraulic Engineering Phenomenon of International Significance. First Comments

Hubert Chanson

Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australie
Ph. : (61 7) 33 65 43 43 63 — Fax : (61 7) 33 65 45 99 — E-mail : h.chanson@uq.edu.au

The 26 December 2004 tsunami was caused by a massive earthquake of magnitude 9.0 off western Sumatra. The tsunami waves propagated in the Indian Ocean with an amplitude of between 0.5 to 1 m. The tsunami waters surged on all coastlines of the Indian Ocean, but the impact was most dramatic in Aceh (Indonesia), Sri Lanka, India and Thailand. This event demonstrated that present tsunami models are not accurate to predict wave runup heights for an event of that magnitude. Further information is available on the Internet {<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/photo.html#Tsunami>}.

I ■ INTRODUCTION

Le tsunami du 26 décembre 2004 est une catastrophe internationale, à l'échelle planétaire. C'est une tragédie humaine, avec plus de 220 000 morts, autant de disparus, et plusieurs millions de personnes affectées. C'est aussi un phénomène hydraulique, qui a été induit par un séisme de magnitude 9,0, localisé le long des fosses de Sumatra et d'Andaman, à l'Ouest de l'île de Sumatra, dans l'Océan Indien (fig. 1). La secousse principale a eu lieu le 26 décembre à 00:58 TU¹, soit 01:58 à Paris et 07:58 à Banda Aceh, Sumatra. C'est l'un des plus importants séismes jamais enregistrés, mais son intensité n'a pas été immédiatement appréciée. Par exemple, l'US Geological Survey listait cet événement comme une secousse de magnitude 8,8, 10 heures après. Au total, plus de 40 secousses sismiques ont été ressenties entre le 25 décembre 23:25 (TU) et le 26 décembre 21:06 (TU), dont une réplique de magnitude 7,1 à 04:21 (TU). L'ensemble de ces secousses était localisé sur plus de 1 000 km, le long d'un axe approximativement Nord-Sud (fig. 1). Notons qu'un volcan de boue est entré en éruption près de l'île de Baratang, Iles d'Andaman, le 28 décembre 2004.

Cette courte note a pour but de présenter, brièvement, le tsunami du 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien, de développer une première analyse et des premiers constats, en se basant sur les informations disponibles à la mi-février 2005.

1. TU = temps universel.

II ■ LE TSUNAMI

● II.1 Présentation

Le mot « tsunami » provient du japonais, ayant le sens de « vague de port ». Techniquement, un tsunami (ou raz-de-marée) est une série de vagues induites par un déplacement des fonds marins, suite à un tremblement de terre, ou un éboulement sous-marin (Yeh *et al.* 1996, Hebenstreit, 1997, Synolakis *et al.* 2003). Le tsunami est une vague longue, qui a une faible amplitude en grandes profondeurs, où elle se propage avec une célérité égale à $\sqrt{g*d}$, où g est l'accélération de la gravité et d est la profondeur. Quand l'onde du tsunami approche la côte, sa vitesse décroît, et son amplitude augmente pour satisfaire l'équation de conservation de l'énergie, jusqu'au moment où la vague déferle.

Le 26 décembre 2004, le tremblement de terre dans la fosse Andaman-Sumatra a induit un tsunami d'une ampleur inconnue dans l'Océan Indien. Compte tenu de la localisation du séisme, sur un axe Nord-Sud, les ondes de tsunami se sont propagées principalement dans l'axe Est-Ouest (fig. 2). Dans l'Océan Indien, l'amplitude de l'onde était de l'ordre de 0,5 à 1 m². Elle est arrivée, à Banda Aceh, 30 minutes après le séisme. Le tsunami a atteint le littoral de l'île de Ceylan, à peu près, deux heures après le tremblement de terre, et celui de l'Afrique de l'Est (Somalie, Kenya), entre 7 et 8 heures après le séisme. On notera que l'arrivée

2. Données altimétriques du satellite Jason 1 (NASA/CNES), orbite N° 129, 2 heures après le tremblement de terre.

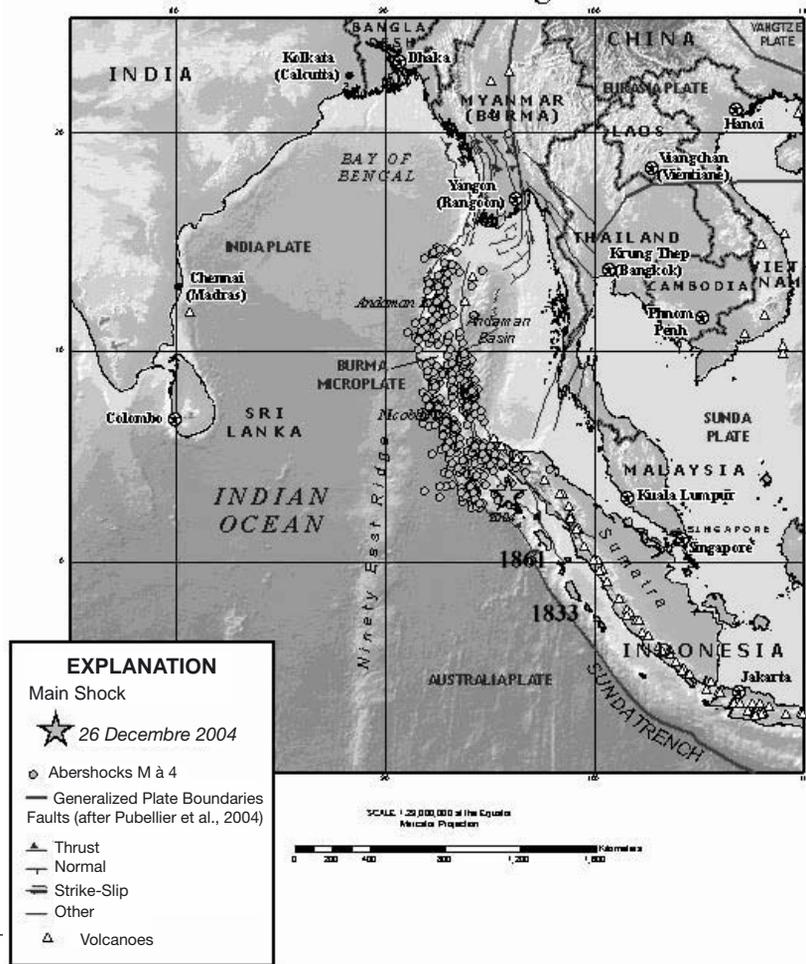


Figure 1 : Carte de l’Océan Indien et locations des secousses sismiques (Carte par l’US Geological Survey, mise à jour le 2 février 2005) — L’épicentre du séisme du 26 décembre 2004 (00 : 58 TU) est indiqué avec une étoile, tandis que la location des séismes de 1833 (magnitude 9,0) et 1861 (magnitude 8,5) est marquée en chiffre.

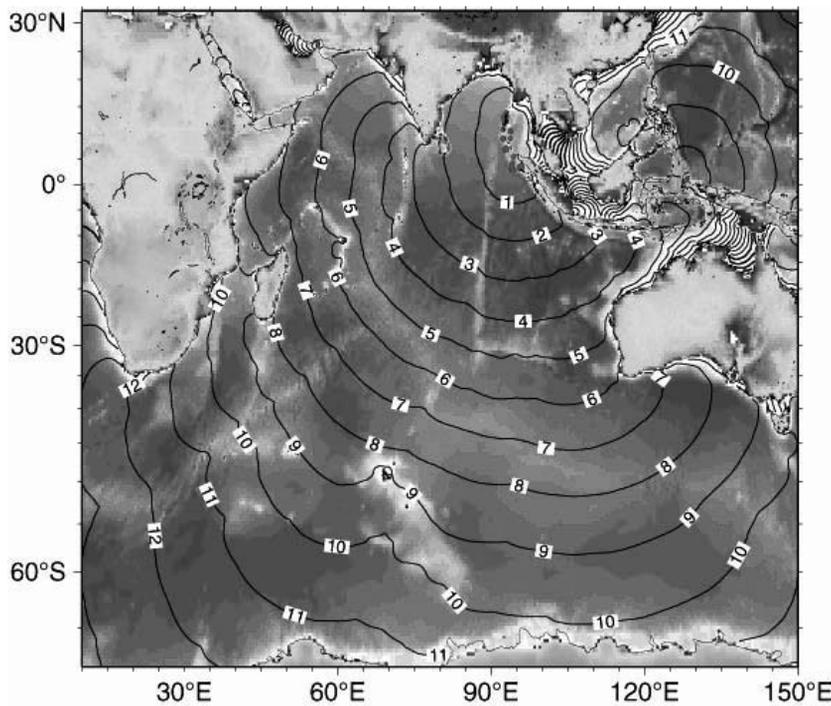


Figure 2 : Propagation du tsunami dans l’Océan Indien : calculs réalisés par le Professeur Kenji SATAKE (National Institute of Advanced Industrial Science and technology, Japon). Les lignes de contour indiquent le temps de propagation (en heures) depuis le tremblement de terre

du tsunami coïncidait avec la marée haute en Thaïlande, Malaisie, Inde et Sri Lanka.

Le tsunami a été ressenti sur toute la planète, même si cela a été dans des proportions relativement plus petites, avec, en particulier, des anomalies dans les enregistrements des marées, par exemple en Australie, au Canada ou au Chili.

● II.2 Le Déferlement sur les côtes

Les ondes du tsunami ont déferlé sur pratiquement toutes les côtes de l'Océan Indien. Mais, c'est en Indonésie (province d'Aceh), au Sri Lanka, en Inde (incluant les îles d'Andaman et Nicobar), et en Thaïlande, que le déferlement

a été le plus dramatique. La *figure 3* montre quelques photographies du déferlement, et des dommages causés par le déferlement et l'inondation qui a suivi, tandis que la *figure 4* montre plusieurs vues d'un même site, sur la côte Nord-Ouest de l'île de Sumatra.

En se basant sur les documents photographiques et vidéo que l'auteur a consultés (ex. *fig. 3, 4 et 5*), on peut estimer que le déferlement du tsunami a eu lieu de différentes manières, en fonction de la localisation et type de littoral, bien qu'il ne soit pas possible de généraliser systématiquement. Sur une grande partie des littoraux (ex. Inde, Sri Lanka, Maldives, Thaïlande, Malaisie), le déferlement fut progressif. L'inondation des zones côtières eut lieu sur une échelle de



Figure 3 : Photographies de l'impact du tsunami dans l'Océan Indien.

(A) Ile de Sumatra, Indonésie.

Gauche : Lho Kruet, Sumatra le 16 janvier 2005 (U.S. Navy photo par le matelot James R. McGury, Réf. 050116-N-0499M-182).

Droite : Ville de Banda Aceh, la mer est à plus de 3 km (Photo par Dr. Jose Borrero, University of Southern California Tsunami research group).

(B) Déferlement du tsunami dans le village de Maddampegam, Sri Lanka, 60 km au sud de Colombo (Photo Gemunu Amarasinghe).





Figure 3 : Photographies de l'impact du tsunami dans l'Océan Indien. (C) Débris, incluant une voiture, sur une plage de Madras Inde, le dimanche 26 décembre 2004.

(D) Déferlement des eaux du tsunami au milieu d'un hôtel, à Khao Lak, Thaïlande, situé 50 km au Nord de l'île de Phuket (Photo par John M. Thompson).



temps de plusieurs minutes. Elle fut « relativement lente », et il semble que la plupart des dommages structurels furent causés par l'inondation.

En Indonésie, et sur certaines parties de la côte thaïlandaise (ex. Patong, Khao Lak), le déferlement fut explosif, impulsif avec des vagues déferlantes de type jet plongeant, impactant sur la côte, ou dans des eaux de faibles profondeurs, sur une échelle de temps de l'ordre de quelques secondes. Quand le déferlement eut lieu en eaux peu profondes, le front de l'onde fut précédé par une forme de ressaut en translation, ou « mascaret », avant de se transformer en ondes de type « rupture de barrage » en atteignant les zones côtières. L'impulsion initiale du flot a induit une avancée rapide et très destructive des eaux, associée à une montée rapide de leur niveau. Par exemple, l'analyse de documents vidéo, à Khao Lak et Patong Beach, montre que l'onde du flot, sur les plaines côtières, au dessus du niveau de plus haute mer, a avancé avec des célérités de l'ordre de 2 à 3 m/s, et que

le niveau des eaux a augmenté, à certains endroits, de 0 à 3 m en moins de 1,5 minutes. A Banda Aceh (Indonésie), une vidéo, prise à quelques kilomètres de la mer³, montre une lave de boue et débris, dont le front avance avec une vitesse de l'ordre de 1,5 à 1,7 m/s, tandis que la hauteur des eaux boueuses atteint 1,5 m en l'espace de 10 à 15 s.

III ■ DISCUSSION

Jusqu'à aujourd'hui, les tsunamis ont causé plus de 350 000 morts sur la Terre (ex. Butcher *et al.*, 1994, Murck *et al.*, 1997, Chanson *et al.*, 2000, Nooa, 2005). Parmi les

3. Cette vidéo, prise initialement pour un mariage, montre les dommages causés le tremblement de terre, suivi de l'avancée soudaine d'une lave de boue et débris. Il semble que la localisation de la prise de vue était située à 2 ou 3 kilomètres du littoral.

catastrophes les plus meurtrières, on compte les tsunamis du 27 janvier 1703, île de Shizoku au Japon (100 000 morts), du 27 août 1883, suite à l'explosion du volcan du Krakatoa, Indonésie (36 000 morts), et du 1er novembre 1755 à Lisbonne, qui tua plus de 60 000 personnes, pour une population portugaise, de l'ordre de 2,2 millions à l'époque. Le tsunami du 26 décembre 2004 est le plus meurtrier, de notre histoire. Son impact économique est très important, avec la destruction quasi-complète de nombreuses communautés agricoles, industries de pêche et industries touristiques, basées dans les zones du littoral. Au Sri Lanka, par exemple, des milliers de plantations agricoles (riz, banane, mangue) ont été complètement oblitérées. Dans de nombreuses régions, les puits d'eau potable et les terres arables ont été inondés et contaminés par l'eau salée. En sus des pertes humaines, l'environnement et les éco-systèmes ont été affectés directement, et indirectement, et cet impact se fera sentir sur plusieurs décades. Par exemple, la destruction des systèmes d'assainissement et des stations d'épuration va entraîner une pollution considérable des eaux dans les mois et années à venir.

La communauté des ingénieurs et chercheurs en hydraulique a été lente à accepter et réagir à l'ampleur du tsunami, puis à en tirer les conséquences. Par exemple, durant les 48 heures qui ont suivi le séisme (26/27/28 décembre 2004),

la quasi-totalité des modèles numériques prédisaient des hauteurs maximales d'inondation (maximum runup height) de l'ordre de 4 à 8 m au Bangladesh, 5 à 10 m en Indonésie, et on craignait une disparition totale des îles Maldives. Les prédictions au Bangladesh étaient complètement erronées, tandis que les dommages causés aux îles Maldives ont été relativement modestes, en comparaison des tragiques pertes humaines au Sri Lanka, et dans les régions côtières de l'Inde du Sud. Ces mêmes modèles numériques ont sous-estimé complètement l'impact du tsunami sur les côtes de l'île de Sumatra (*fig. 4 et 5*). Des mesures in-situ par l'équipe du Dr TSUJI ont montré que les hauteurs maximales d'inondation ont atteint près de 35 m, au dessus du niveau de la mer, dans certaines zones de la côte Nord-Ouest (*fig. 5*). La *figure 5* montre les hauteurs mesurées sur la côte Nord-Ouest de l'île de Sumatra, dans la ville de Banda Aceh, et sur l'île de Sabang, au large de Banda Aceh. La *figure 4* correspond à un site sur la côte Nord-Ouest de l'île de Sumatra, où le hauteur maximale d'inondation a dépassé 30 mètres.

Il est clair que les ingénieurs hydrauliciens ont « du pain sur la planche ». Il est reconnu que les caractéristiques de la source sismique ont un impact important sur la modélisation du tsunami. Par contre, la catastrophe du 26 décembre a montré d'autres aspects, spécifiques au déferlement, qui doivent être pris en compte de manière plus précise.

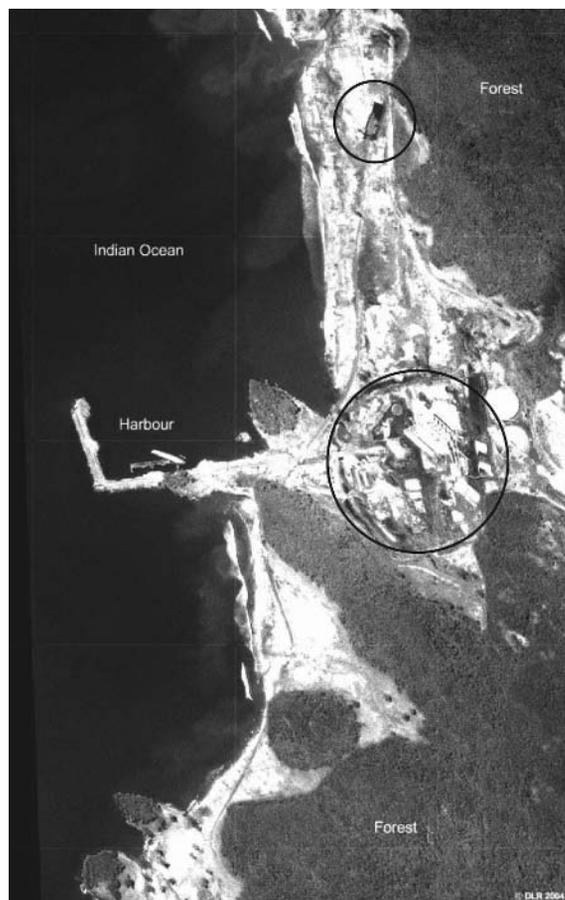


Figure 4 : Impact du tsunami sur la côte nord-ouest de Sumatra, à Lhoknga, situé à 60-70 km sud de Banda Aceh.

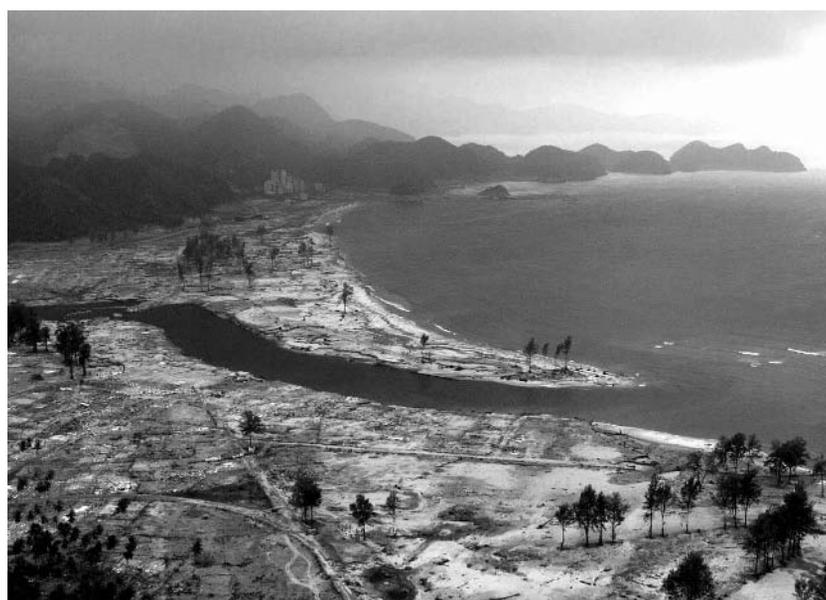
(A) Photographies par satellites — DLR/IKONOS data from Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (Credit « Space Imaging/CRISP-Singapore »).

Gauche : 10 janvier 2003. Droite : 29 décembre 2004 ; les cercles correspondent à la barge et à la cimenterie, vues sur les figures 4B1, 4B2 et 4B3.



(B1) Barge et remorqueur, avec le port et un cargo coulé dans le fond (Photo par Dr. Jose Borrero, University of Southern California Tsunami research group).

(B2) Cimenterie (Photo par Dr. Jose Borrero, University of Southern California Tsunami research group).



(B3) Vue vers le sud, avec la cimenterie, la barge et la jetée en arrière-plan le 4 janvier 2005 (U.S. Navy photo par le matelot Tyler J. Clements, Réf. 050104-N-6817C-23).

Figure 4 : Impact du tsunami sur la côte nord-ouest de Sumatra, à Lhoknga, situé à 60-70 km sud de Banda Aceh.
(B) Photographies sur le terrain, après le tsunami — Voir cercles sur la figure 4A, droite.

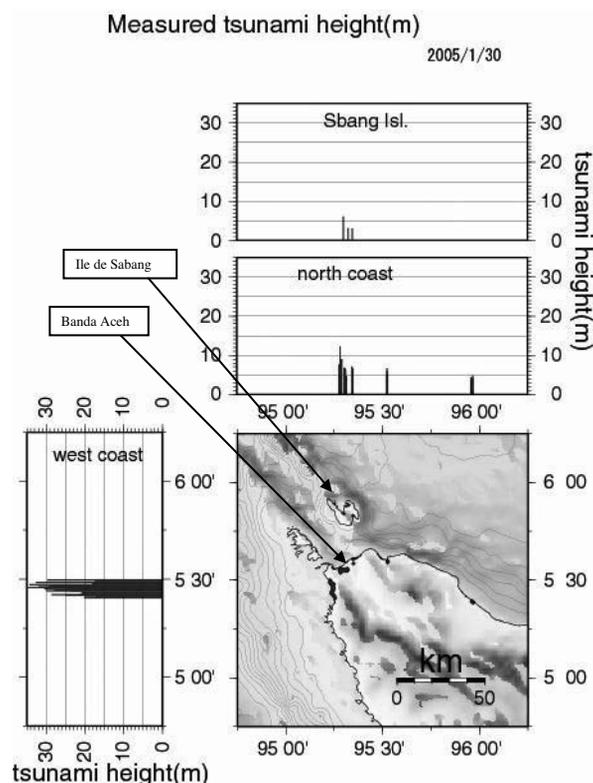


Figure 5 : Hauteurs mesurées atteintes par les eaux du tsunami à Banda Aceh, et sur le côté nord-ouest de Sumatra, Indonésie. Mesures par l'équipe japonaise du Dr. Y. Tsuji (Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japon), dessin par Masafumi Matsuyama (Central Research Institute of Electric Power Industry, Japon) — Notons que les marées ont été prises en compte, et que ces informations sont des vraies hauteurs atteintes par le tsunami.

En Indonésie et en Thaïlande, on a observé un déferlement « explosif », générant des ondes, vagues et rouleaux avec des caractéristiques similaires aux mascarets en eaux peu profondes, et aux ondes de rupture de barrage sur les plaines côtières, au dessus du niveau de la mer. De plus, on a observé une érosion intense des plaines côtières, en particulier en Indonésie (fig. 3 et 4) et en Thaïlande (ex. Khao Lak). Cette abrasion, très significative, a été associée à des concentrations importantes de débris dans les écoulements. Il s'agit de débris de tailles importantes (ex. planches, poutres, voitures) qui ont pu contribuer à abîmer d'autres structures, mais, aussi, des matériaux fins tels que des argiles. A Banda Aceh, des films et photographies ont montré des laves de boues. Ce type d'écoulements est non-Newtonien, et il ne peut pas être prédit avec des modèles ou équations développés pour des fluides Newtoniens (Coussot, 1997, Chanson *et al.*, 2004).

Beaucoup d'informations audio-visuelles ont été disponibles relativement rapidement, même si celles-ci ont été centrées principalement sur les hôtels touristiques, avec leurs occupants occidentaux. Ceci constitue de nouvelles sources

(L'auteur en parle avec autorité, car il est un expert en mascarets et ondes de rupture de barrage, tandis qu'il a analysé plus de 20 documentaires vidéo sur le déferlement du tsunami du 26 décembre.)

d'informations pour chercheurs et ingénieurs qu'il ne faut pas négliger. Il faut espérer que ces données et les mesures scientifiques traditionnelles permettront de développer de nouveaux modèles de prédiction de la propagation des tsunamis, permettant d'obtenir, très rapidement, des prédictions fiables, en particulier en termes de déferlement et d'inondation des régions côtières.

IV ■ SOMMAIRE ET CONCLUSION

Le tsunami du 26 décembre 2004 est un événement tragique, qui a affecté des centaines de milliers, voir millions de personnes, principalement autour de l'Océan Indien. L'ampleur du phénomène et son intensité, ont stupéfié la communauté et ont pris de court les scientifiques et ingénieurs. Peu de gens imaginaient une catastrophe hydraulique de cette importance ! L'expérience des journées qui ont suivi le tremblement de terre, a montré que les systèmes de prédiction de tsunami et les modèles numériques associés, sont inadéquats pour traiter un phénomène de la magnitude de celui du 26 décembre, en particulier la propagation des eaux sur les plaines côtières.

Il est à espérer que ces commentaires généreront un intérêt soutenu de la part de la communauté des ingénieurs hydrauliciens sur le problème de l'hydraulique du tsunami et de son déferlement sur les plaines côtières. Le lecteur trouvera une liste bibliographique dans l'Annexe I, ainsi que de plus amples informations sur le site Internet {<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/photo.html#Tsunami>}.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier toutes les personnes qui lui ont fourni des témoignages, des photographies, des vidéos et toute forme de renseignement sur cette catastrophe.

BIBLIOGRAPHIE

- BUTCHER G.W., BEETHAM R.D., MILLAR P.J. and TANAKA H. (1994). — « The Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake. Final Report of the NZNSEE Reconnaissance Team ». *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 27, No. 1, p. 2.
- CHANSON H., AOKI S. and MARUYAMA M. (2000). — « Experimental Investigations of Wave Runup Downstream of Nappe Impact. Applications to Flood Wave Resulting from Dam Overtopping and Tsunami Wave Runup ». *Coastal/Ocean Engineering Report*, No. COE00-2, Dept. of Architecture and Civil Eng., Toyohashi University of Technology, Japan, 38 pages.
- CHANSON H., COUSSOT P., JARNY S. and TOQUER L. (2004). — « A Study of Dam Break Wave of Thixotropic Fluid: Bentonite Surges down an Inclined plane ». *Report No. CH54/04*, Dept. of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 90 pages.
- COUSSOT P. (1997). — « Mudflow Rheology and Dynamics ». *IAHR Monograph*, Balkema, The Netherlands.
- HEBENSTREIT G. (1997). — « Perspectives on Tsunami Hazard Reduction. Observations, Theory and Planning ». *Kluwer Academic*, Dordrecht, the Netherlands, 218 pages (also *Proc. 17th Intl Tsunami Symp.*, AGU, Boulder CO, USA, July 1995).

- MURCK B.W., SKINNER B.J. and PORTER S.C. (1997). — « Dangerous Earth. An Introduction to Geologic Hazards ». *John Wiley*, New York, USA, 300 pages.
- NOAA (2005). — « Compilation of Report, Data and Information — 26 December 2004 Indonesian Earthquake and Tsunami ». *Internet Resource* {<http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/sumatra20041226.html>}.
- SYNOLAKIS C.E., BARDET J.P., BORRERO J., DAVIES H.L., OKAL E.A., SILVER E.A., SWEET S. and TAPPIN D.R. (2002). — « The Slump Origin of the 1998 Papua New Guinea Tsunami ». *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 458, pp. 763-789.
- TSUJI Y. (2005). — « Distribution of the Tsunami Heights of the 2004 Sumatra Tsunami in Banda Aceh measured by the Tsunami Survey Team ». *Internet Resource* {<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/namegaya/sumatera/surveylog/eindex.htm>}.
- YEH H., LIU P. and SYNOLAKIS C. (1996). — « Long-wave Runup Models ». *World Scientific*, Singapore, 403 pages (also *Proc. 2nd Intl Workshop on Long-Wave Runup Models*, Friday Harbour WAS, USA, Sept. 1995).

ANNEXE I — BIBLIOGRAPHIE

● Revues scientifiques

- BHATTACHARJEE Y. (2005). — « Indian Ocean Tsunami : In Wake of Disaster, Scientists Seek Out Clues to Prevention ». *Science*, 7 Jan. 2005, pp. 22-23.
- PEARCE F. (2005). — « Tsunami's salt water may leave islands uninhabitable ». *New Scientist*, 5 Jan. 2005.
- MARRIS R. (2005). — « Inadequate warning system left Asia at the mercy of tsunami ». *Nature*, Vol. 433, 7 Jan. 2005, pp. 3-5.
- SCHIERMEIER Q. (2005). « On the Trails of Destruction ». *Nature*, Vol. 433, 27 Jan., pp. 350-353.

● Sites Internet

Sites généraux

- USGS Earthquake Hazards Program report {<http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/>}
- NOAA 26 December 2004 Indonesian Earthquake and Tsunami Compilation {<http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/sumatra20041226.html>}
- IAHR Tsunami Catastrophe in Indian Ocean - E-library resources {<http://www.iahr.org/>}
- Tsunami photographs and informations {<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/photo.html#Tsunami>}
- Engineering report by the French Atomic Energy Commission {http://www.dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2004-12-26/index.html} (in French).
- The December 26, 2004 Earthquake Tsunami Disaster of Indian Ocean by Research Group on The December 26, 2004

Earthquake Tsunami Disaster of Indian Ocean {<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-e.html>}

Etudes sur le terrain

- Engineering survey at Phuket and report by a Japanese-Thai research team led by DPRI Kyoto {http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/thailand/phuket_survey_e.html}
- Second Engineering survey at Phuket and report by a Japanese-Thai research team led by DPRI Kyoto {<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/thailand>}
- Report and photographs on tsunami damage in Indonesia by Dr Jose Borrero, University of Southern California {http://www.usc.edu/dept/tsunamis/2005/tsunamis/041226_indianOcean/sumatra/sumatra.html}
- Engineering Report on tsunami runup heights in Indonesia, by the International Tsunami Information Center (ITIC) Team {<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/namegaya/sumatera/surveylog/eindex.htm>}.
- Engineering report on tsunami runup heights around Galle, Sri Lanka, by a Japanese team {http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/srilanka/galle_survey_e.html}

Engineering report on tsunami runup heights around Southern Part of Sri Lanka, by Yokohama National University {http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/SriLanka_survey_result/srilanka_survey_ynu_e.html}

USC Tsunami Research Group {<http://www.usc.edu/dept/tsunamis/2005/index.html>}

Photographies et documents audio-visuels

- NASA Earth Observatory photographs of the devastated coastal zones {http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/shownh.php3?img_id=12643} - See also « Other Images for this Event ».
- Series of video from « Waveofdestruction.org » {<http://www.waveofdestruction.org/>}
- Tsunami photographs {<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/photo.html#Tsunami>}
- Ile de la Reunion : {http://m-r.li/mon_image.php?f=radoub.jpg}.
- Photographs on tsunami damage in Indonesia by Dr Jose BORRERO, University of Southern California {http://www.usc.edu/dept/tsunamis/2005/tsunamis/041226_indianOcean/sumatra/sumatra.html}
- Photo / Image Database by Kenji Harada, DPRI University of Kyoto - The December 26, 2004 Earthquake Tsunami Disaster of Indian Ocean {<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/photo/?exec=SEARCH&m=s&q=kenji+harada>}
- Thailand Tsunami - My Experience in Khao Lak - 26 December 2004, par John M. THOMPSON {<http://www.sonomacounty-law.com/tsunami/photos.htm>}