

Comment prévenir et prévoir les tsunamis ?

La catastrophe survenue le 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a donné une nouvelle dimension aux programmes d'étude et de prévention des tsunamis. Avec le CEA, la France joue dans ce domaine un rôle éminent sur le plan international.

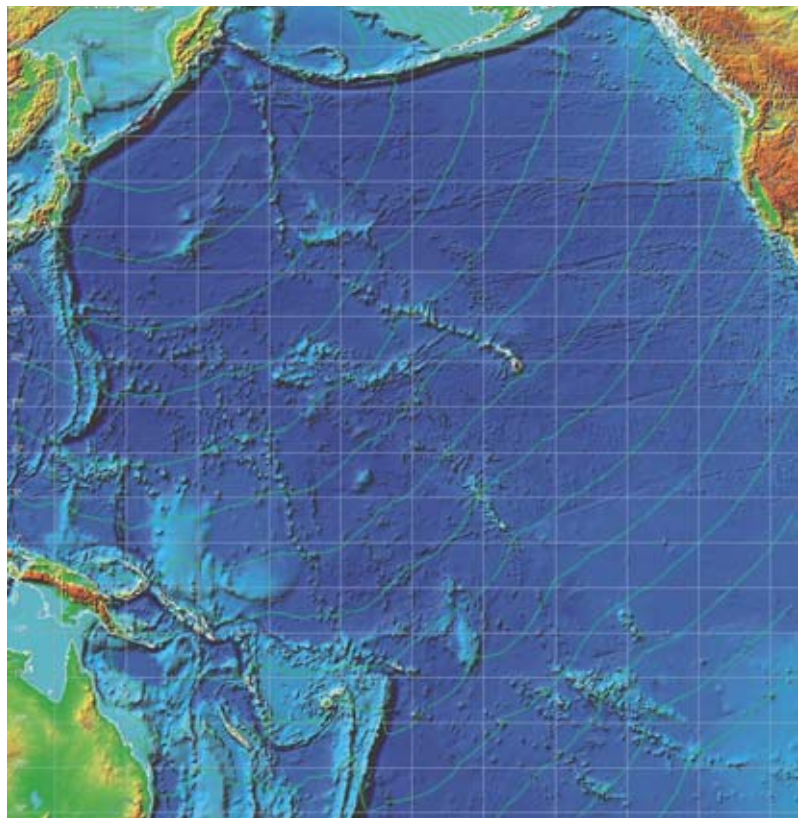
Depuis le 26 décembre 2004, la prise de conscience du phénomène **tsunami** s'est considérablement accrue. Le CEA a pris part à plusieurs projets de recherche qui ont été lancés à la suite de cet événement, ce qui a permis de dynamiser ses activités dans le domaine de la **simulation numérique** et de l'alerte aux tsunamis. Tous ces domaines étaient déjà bien abordés à travers la participation du CEA dans le Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (*Pacific Tsunami Warning System*), et s'en trouvent confortés pour relever les nouveaux défis en matière de prévention et de prévision.

Les tsunamis existaient-ils avant 2004 ?

La catastrophe du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a suscité une émotion mondiale, relayée par une couverture médiatique sans précédent, et s'est doublée, pour nombre d'entre nous, de la découverte de ce phénomène exceptionnel qu'est un grand tsunami transocéanique. Les géophysiciens connaissaient depuis longtemps les caractéristiques des tsunamis (Mémo E, *Comment naît et se propage un tsunami ?* p. 105) et se souvenaient ainsi d'événements récents, capables de provoquer des dégâts importants et des centaines de victimes suite à un **séisme** ou un effondrement sous-marin (1998, Papouasie-Nouvelle-Guinée, environ 2 000 victimes parmi des villages de pêcheurs), mais également d'affecter modérément une mer apparemment peu concernée, au moins à l'échelle d'une vie humaine (2003, suite au séisme de Boumerdès en Algérie, de nombreux dégâts dans les ports et quelques inondations ponctuelles aux Baléares et remous dans certains ports de la côte d'Azur).

Cet événement de l'océan Indien a totalement modifié la perception du phénomène et a sensibilisé toute une population de scientifiques et de décideurs. De très nombreux chercheurs et instituts ont commencé à s'intéresser à ce phénomène, auparavant largement ignoré.

Au CEA, le sujet était d'intérêt depuis les années 1960. À cette époque, sous l'égide internationale de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture), le premier système d'alerte aux tsunamis se déployait dans le Pacifique, avec son centre opérationnel à Hawaï, durement touchée par plusieurs grands tsunamis transocéaniques dans les années 1940 à 1960.



Calcul des temps d'arrivée dans le Pacifique du tsunami déclenché suite au fort séisme de magnitude 8,3 qui s'est produit aux îles Kouriles au nord de l'océan Pacifique le 15 novembre 2006. Il montre que la Polynésie française est touchée environ 11 heures après le séisme, 1 heure séparant chaque courbe.

La présence française du CEA dans le Pacifique conduisit le laboratoire du CEA de Tahiti (archipel de la Société, Polynésie française) à prendre part à ce système d'alerte dès les premières années de sa mise en place, et de cette contribution résulte aujourd'hui le seul centre d'alerte aux tsunamis en fonctionnement, qui soit géré par la France : le Centre polynésien de prévention des tsunamis, basé à Tahiti.

Connaissance et prévention du risque tsunami

Depuis 1960, le CEA a largement contribué à la connaissance, la prévention et l'alerte des tsunamis, dans deux directions complémentaires. Le premier domaine est l'utilisation de méthodes de simulation numérique afin d'évaluer l'aléa, en validant les **codes de calcul** à partir d'observations d'événements récents



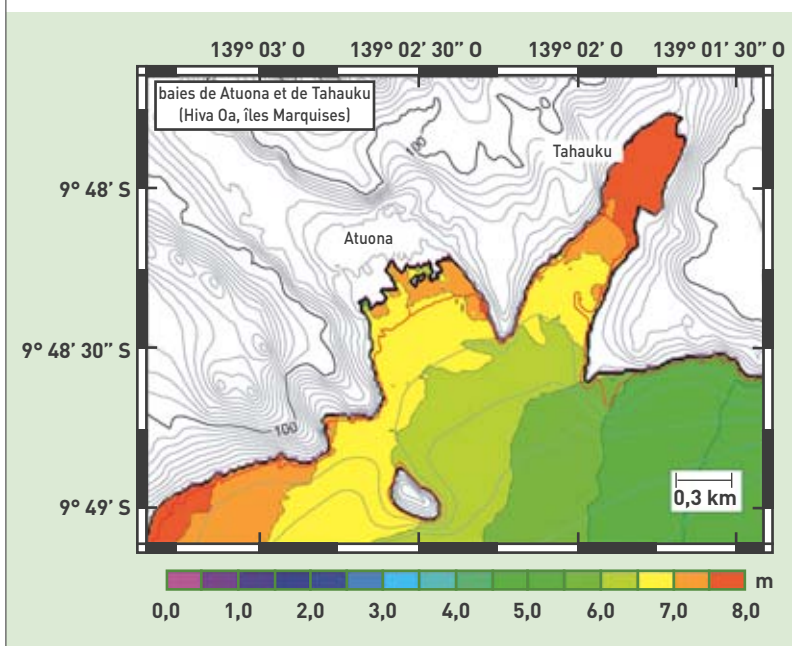
CNRS/Photothèque/Franck Langine

Plage de Lhok Nga, en janvier 2005, dévastée lors du tsunami de Sumatra du 26 décembre 2004 avec, au fond à droite, les traces hautes de 15 m laissées par les déferlantes sur les pentes de la colline.



CEA/DAM

Les effets de tsunamis dans la baie de Tahauku, près de Atuona, sur l'île de Hiva Oa (îles Marquises). Ces tsunamis provenaient du Chili (30 juillet 1995, magnitude 8,0; photographies à gauche et au milieu) ou du Pérou (21 février 1996, magnitude 7,5; photographie à droite) et n'ont provoqué que des dégâts matériels. Par contre, la gêne a été considérable pour les embarcations et les rivages proches; il y a eu des inondations assez importantes près de ce petit port. De nombreux tourbillons et courants forts ont ainsi rejeté des bateaux à l'extérieur du port, et ces phénomènes peuvent durer plusieurs heures.



CEA/DAM

Figure 1. Hauteurs maximales d'inondation pour deux baies marquisiennes, calculées pour 5 scénarios de tsunami trans-Pacifique maximisants. Le trait de côte initiale est la ligne rouge, montrant des inondations horizontales pouvant atteindre 300 m (Atuona), voire 600 m (Tahauku). De telles inondations se sont produites au xx^e siècle 3 à 4 fois dans ces baies.

et en simulant des scénarios potentiels pour proposer des actions de *prévention du risque*. Le deuxième axe concerne la mise au point de méthodes de *surveillance et d'alerte en temps réel* à partir des enregistrements sismiques afin de prévenir au plus vite, et seulement en cas de danger, les services de protection civile.

Sur le premier point, les travaux du CEA ont longtemps concerné l'océan Pacifique. Les statistiques disponibles et les événements connus montrent que c'est le bassin le plus touché, et les territoires polynésiens localisés au centre de cet océan sont potentiellement exposés à tous les grands tsunamis provenant des **zones de subduction** entourant la région, ce qui a lieu 5 à 7 fois par siècle. Les études des événements passés avaient révélé que certaines îles polynésiennes étaient systématiquement plus touchées que les autres: les îles Marquises (Polynésie française). Dans cet archipel, les larges baies sont ouvertes directement sur l'océan, sans récif corallien protecteur, et des inondations s'y sont produites plusieurs fois par siècle. Localement, la langue marquisienne possède d'ailleurs un vocable particulier pour ce phénomène remarqué de débordement anormal de la mer, le *Tai Toko*.

Des études ont été menées à l'aide de la simulation numérique, notamment dans le cadre du projet récent ARAI (*protéger* en polynésien), pour lequel le CEA a réalisé les études d'aléa sismique et tsunami. Les résultats ont confirmé la vulnérabilité de ces baies, principalement pour les tsunamis originaires d'Amérique du Sud, mais également des Aléoutiennes, Kouriles, ou Tonga. La probabilité d'inondations atteignant plus de 3 m d'altitude peut y être estimée supérieure à 4 fois par siècle (figure 1). Les autres archipels polynésiens sont moins sensibles, certains tels que la Société et les Australes pouvant cependant être affectés par des vagues montant jusqu'à 3 m, 2 fois par siècle. Ces travaux permettent de contribuer à l'élaboration des Plans de prévention des risques (PPR) en cartographiant les zones inondables.

Depuis 2004, le CEA a participé à plusieurs projets de recherche, initiés à la suite de la catastrophe de l'océan Indien. Dans le projet français TSUMOD, financé par l'ANR (**Agence nationale de la recherche**) et coordonné par le CEA, les outils de simulation numérique ont été confrontés à la fois à la base de données exceptionnelle de l'événement de 2004 recueillie sur les rivages de l'océan Indien, mais également à d'autres outils de simulation existants. Les résultats obtenus montrent que des simulations s'appuyant sur une connaissance précise de la topographie locale permettent de très bien reproduire le film des inondations catastrophiques à Banda Aceh sur l'île indonésienne de Sumatra (figure 2), et soulignent à nouveau que ces simulations devraient pouvoir être réalisées sur des sites exposés, bien avant qu'un tel événement ne survienne. Simultanément, les outils de simulation sont affinés pour prendre en compte le plus de détails possibles sur la source, le calcul des amplifications locales et l'estimation de marégrammes synthétiques (c'est-à-dire la modélisation de l'évolution du niveau de l'eau dans un port ou une baie, à comparer avec les **marégrammes** réels qui enregistrent notamment les marées hautes et basses, mais aussi les arrivées de tsunamis).

Le CEA avait déjà participé à des projets de recherche européens GITEC (*Genesis and Impact of Tsunamis on European Coasts*) et GITEC-TWO dans les années 1990, pour étudier notamment les tsunamis européens survenus au Portugal (1755, 1969). Le projet TRANSFER (2006-2009) – *Tsunami Risk ANd Strategies For the European Region* – a été soutenu par la **Commission européenne**, dans le cadre du **6^e PCRD** (Programme cadre de recherche et de développement). Il visait à réviser les catalogues historiques de tsunamis, à établir des cartes d'inondation sur des sites tests et à proposer des outils pour mettre en place un futur système d'alerte. Dans TRANSFER, le CEA a mené des travaux sur l'impact des tsunamis sur les Baléares et en mer de Marmara (entre les parties européenne et asiatique de la Turquie), reconsidérant l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale, qui est méconnu.

Vers les systèmes d'alerte aux tsunamis dans tous les océans

Depuis 2004, la communauté internationale, toujours sous l'égide de l'Unesco, a initié des systèmes d'alerte pour l'ensemble des bassins exposés. Le CEA participe notamment à la construction du futur Système d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée (SATANEM). L'ensemble des études réalisées dans le domaine de la prévention appuie et nourrit les réflexions pour la mise en place de ces systèmes, en permettant de préciser les critères d'alerte. En effet, un système d'alerte efficace ne doit être déclenché qu'en cas d'événement potentiellement dangereux, et est surtout tenu d'éviter des fausses évacuations qui le discréditeraient. Soulignons que la plupart des tsunamis ne sont dangereux que localement, à moins d'une centaine de kilomètres de la source, ou régionalement (< 1 000 km). Seuls quelques événements présentent un potentiel destructeur à plus de 1 000 km de la source, pouvant

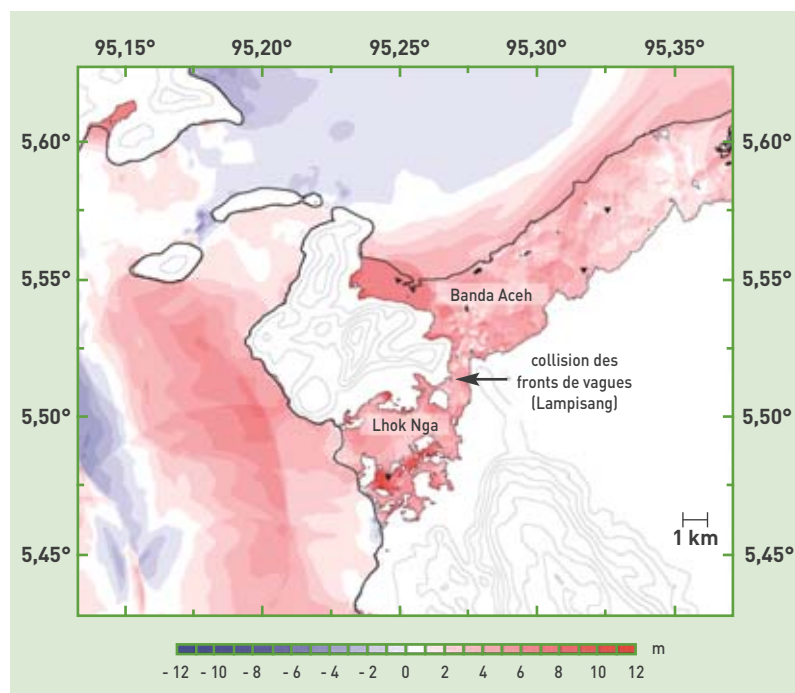
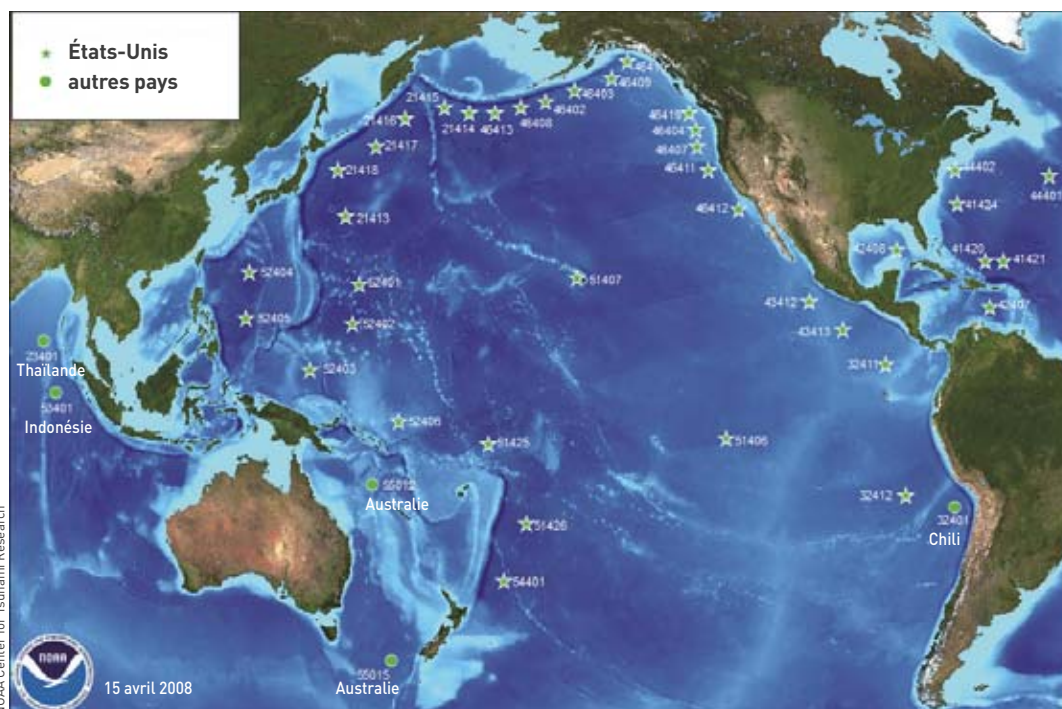


Figure 2. Inondation de la région de Banda Aceh (pointe nord de Sumatra), simulée à partir d'un modèle numérique de terrain précis, et à l'aide des caractéristiques du séisme du 26 décembre 2004. Le trait de côte initiale est le trait noir épais. Cette simulation reproduit l'extension des inondations et la rencontre des flots.

produire des inondations catastrophiques en de nombreux sites.

Prévoir un tsunami revient essentiellement à deux démarches et résultats complémentaires. La première exploite les résultats des études de prévention évoquées plus haut, sous la forme de bases de données de tsunamis passés, complétés par des simulations de scénarios probables. Les résultats de ces études contribuent non seulement à établir les PPR, mais sont utilisés en cas d'alerte pour connaître les zones potentiellement exposées.



Le réseau de bouées DART (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*) installées dans le Pacifique pour suivre en temps réel l'évolution des tsunamis, en mesurant les hauteurs de vagues, et pour alerter les rivages distants exposés.

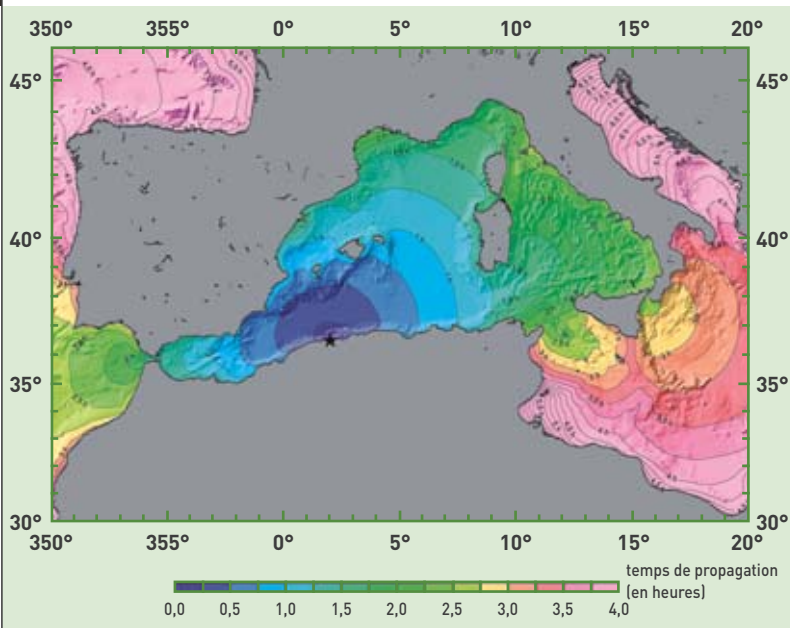


Figure 3. Simulation des temps d'arrivée du tsunami pour une source localisée sur un **épicerie** hypothétique dans l'ouest de l'Algérie. Les côtes de la Méditerranée occidentale sont potentiellement atteintes entre 15 et plus de 120 minutes après le séisme.

La deuxième démarche est la prévision en temps réel d'un tsunami, lorsqu'un séisme se produit. Le point de départ est la détection la plus rapide possible de l'événement source pour en caractériser la **magnitude** et la localisation : c'est un défi que peuvent actuellement relever les sismologues en moins de 15 minutes. Simultanément, il faut pouvoir prédire avec le maximum de précision quelles sont les zones potentiellement menacées par un tsunami, où il va être nécessaire de procéder à des mises à l'abri des populations. Ceci est primordial pour des régions telles que la Méditerranée où le délai entre le séisme et l'arrivée de la première vague est extrêmement court, de quelques dizaines de minutes (figure 3). Il convient pour cela d'utiliser les résultats de centaines de scénarios déjà effectués, et comparer les signaux simulés avec les enregistrements réels des stations de mesure du niveau de la mer, et enfin tenir compte



Vue du marégraphe de Rikitea (îles Gambier, Polynésie française), appareil servant à enregistrer les variations du niveau de l'océan. Le dispositif d'acquisition et de transmission est placé suffisamment haut par rapport à l'océan, en cas de vagues très élevées.

des rapports entre ces deux signaux pour recalculer le long du littoral l'inondation du tsunami. Cette méthode est en cours de test dans le **Pacific Tsunami Warning Center** à Hawaï et devrait équiper les centres d'alerte du Pacifique dans les prochaines années.

Une contribution active

Le CEA est le représentant de la France au Groupe intergouvernemental de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (GIC/SATP) depuis les années 1960. Il contribue aux différentes composantes scientifiques sous-jacentes : l'évaluation de l'aléa et l'amélioration des systèmes de détection et d'alerte. Il a d'ailleurs été sollicité dans ce sens par le Secrétariat d'État à l'Outre-Mer pour définir l'architecture du réseau de surveillance du niveau de la mer adapté pour les régions de Nouvelle-Calédonie, des Loyauté et de Wallis-et-Futuna, ainsi que les critères d'alerte pour ces différentes îles et pour La Réunion, en vue de l'élaboration du Plan d'alerte et de secours spécifique tsunami. Aujourd'hui, le CEA a été désigné par la France pour coordonner le Centre d'alerte aux tsunamis pour la Méditerranée et l'Atlantique nord-est. Le futur centre, fonctionnel en 2012, sera hébergé sur le site de Bruyères-le-Châtel (Essonne), et sera responsable de l'alerte spécifiquement pour la Méditerranée occidentale dans le cadre du système international en construction. À ce titre il est le "point focal" tsunami dans le Groupe de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-est et participe aux groupes de travail visant à établir le futur Système d'alerte pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée.

➤ **Hélène Hébert, François Schindelé et Anne Loevenbruck**

Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

POUR EN SAVOIR PLUS

H. HÉBERT et F. SCHINDELÉ, "Peut-on prévoir les tsunamis ?", Collection *Les Petites Pommés du Savoir*, Le Pommier, 2006.

F. SCHINDELÉ et H. HÉBERT, "La surveillance des tsunamis transocéaniques", *Pour la Science*, dossier n° 51 "Les éléments en furie", p. 64-67, 2006.

F. SCHINDELÉ et H. HÉBERT, "À quand la prévision des tsunamis ?", *Geosciences*, 2006.

F. SCHINDELÉ, D. REYMOND, H. HÉBERT, P. HEINRICH, "Les risques naturels d'origine géophysique aux îles Marquises (Polynésie française)", *Géologie de la France*, 2, p. 37-50, 2002. <http://geolfrance.brgm.fr/article.asp?annee=2002&revue=2&article=2>.

Conférence à l'IPGP, "Tsunami de l'océan Indien", disponible sur www.ipgp.jussieu.fr/pages/040805.php?name=20050203, février 2005.

Conférence et conférence de presse de la Cité des sciences et de l'industrie, Exposition "Risque sismique", décembre 2005, http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/v2/html/2005_2006/conferences/conference_153.htm.

Conférence à l'École normale supérieure de Paris, "Le Tsunami, un an après", janvier 2006, <http://www.diffusion.ens.fr/index.php?res=conf&idconf=1059>.