

Introduction

Franck LAVIGNE et Raphaël PARIS

1. Le tsunami du 26 décembre 2004 dans son contexte scientifique

1.1. L'Indonésie est un des pays les plus touchés par les tsunamis

Un tsunami est une onde marine exceptionnelle qui, en s'approchant des côtes, s'exprime par des vagues de très haute énergie et une inondation des zones côtières. Le terme est dérivé d'un mot japonais qui signifie « vague portuaire » (*harbor wave*). D'autres appellations ont été utilisées, telles que « vague marine sismique » (*seismic sea wave*), les séismes étant la première cause de tsunami (82,3 %). Les côtes proches des zones de convergence de plaques, et particulièrement les arcs insulaires, sont donc les plus exposées (Fig. 1 et 2) : Chili et Pérou (1570, 1746, 1868, 1960), Japon (plus de 330 tsunamis répertoriés par la NOAA depuis l'an 684), Caraïbes (127 tsunamis dont 80 clairement avérés et plus de 3 000 victimes depuis 1498, d'après O'Loughlin & Lander, 2003), Indonésie (11 tsunamis ayant entraîné des pertes humaines depuis 1965, 235 tsunamis durant les 4 derniers siècles), Kamtchatka et Kouriles (124 tsunamis entre 1737 et 1990, dont 15 ayant traversé une partie du Pacifique,

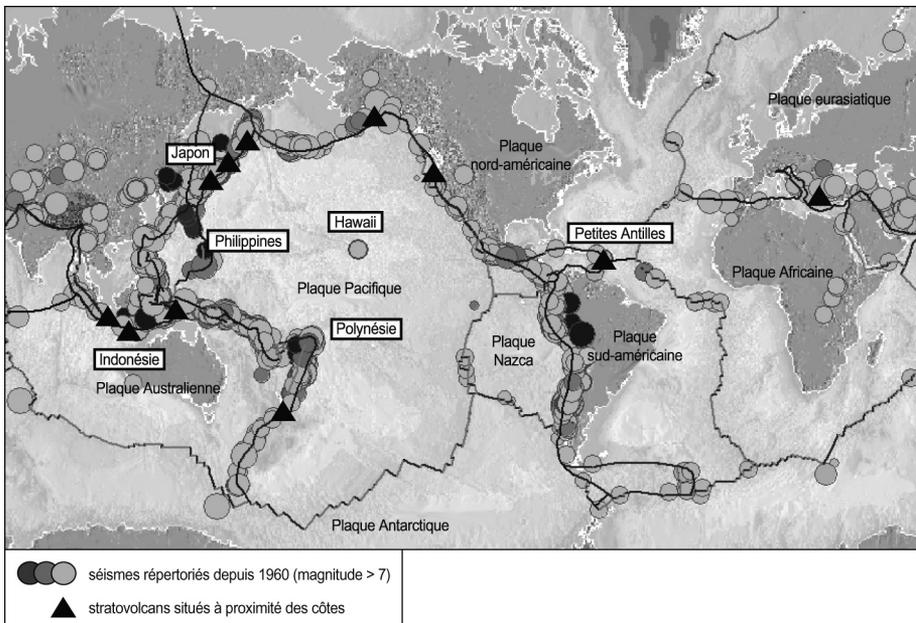


FIG. 1. Carte des sources potentielles de tsunami dans le monde.

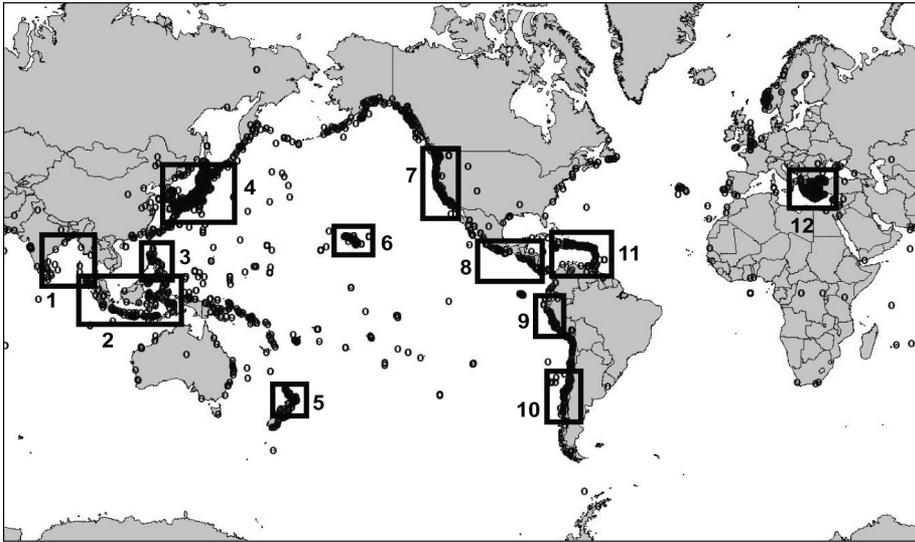


FIG. 2. Carte des tsunamis répertoriés depuis 2 000 ans et des principales régions vulnérables

(1 : golfe du Bengale ; 2 : Indonésie ; 3 : Philippines ; 4 : Japon ; 5 : nord de la Nouvelle-Zélande ; 6 : Hawaii ; 7 : côtes du Washington et de la Californie ; 8 : Amérique centrale ; 9 : Pérou ; 10 : Chili central ; 11 : Antilles ; 12 : Bassin oriental de la Méditerranée).

d'après Gusiakov & Osipova, 1993). En termes de risque, les côtes les plus vulnérables sont celles alliant l'aléa de tsunami à de fortes densités de population et d'infrastructures économiques (Fig. 1). Le total des victimes de tsunamis depuis 450 ans s'élève désormais à environ 491 000, dont 130 000 au Japon et 221 000 en Indonésie (statistiques fournies par le National Geophysical Data Center, NOAA).

La propagation des ondes de tsunamis sur de longues distances affecte aussi des secteurs où la sismicité est faible, comme les îles du Pacifique (Hawaii, Polynésie) et la côte est de l'Australie. Certes moins menacées en termes de récurrence, les côtes européennes situées à proximité des principales failles marquant la limite entre les plaques africaine et eurasiatique ne sont pas épargnées, comme l'atteste le tsunami de Lisbonne en 1755 (environ 90 000 morts). Les glissements de terrain et éruptions volcaniques peuvent aussi générer des tsunamis destructeurs (ex. éruption tsunamigénique du Krakatau en 1883, en Indonésie). Les tsunamis de forte intensité engendrent donc des catastrophes à l'échelle régionale, voire transocéanique. Ainsi, le tsunami de décembre 2004, généré par un puissant séisme de magnitude 9.3 à une centaine de kilomètres à l'ouest de Sumatra, s'est-il propagé à la fois vers le nord et la mer d'Andaman (faisant plus de 5 000 victimes en Thaïlande deux heures après le séisme), et dans l'océan Indien, frappant successivement le Sri Lanka au bout de 2 heures

TAB. 1. *Principaux tsunamis répertoriés en Indonésie depuis 1900.*

Année	Localisation	Magnitude	Runup (m)	Victimes
1907	Ouest Sumatra	7.4		400
1917	Nord Bali	6.5		15 000
1918	Nord Sulawesi	8.2	12	102
1927	Ouest Sulawesi	6.0	15	50
1928	Ouest Sulawesi		10	128
1965	Buru, Moluques	7,5	4	71
1967	Sud Sulawesi	5,8		58
1968	Ouest Sulawesi	7,5	10	200
1969	Sud-ouest Sulawesi	6,9		64
1977	Sumba	8.3	15	189
1979	Nord Flores		10	539
1992	Est Flores	7,5	26	1 960
1994	Sud-Est Java	6,8	14	238
1996	Biak, Irian Jaya	8.0	7	110
2004	Nord-ouest Sumatra	9.3	> 30	180 000
2006	Sud Java	7.7	15	723
2010	Ouest Sumatra	7.7	8,8	> 500

de propagation (31 000 morts), puis l'Inde en moins de 3 heures (11 000 morts) et enfin les côtes africaines 9 heures plus tard (240 morts en Somalie, pays africain le plus touché, à 5 700 km de l'épicentre).

Près de 75 % des littoraux indonésiens sont exposés aux tsunamis, soit 12 000 km de côtes. Avant le dramatique tsunami du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien (au moins 180 000 morts et disparus pour l'Indonésie), les tsunamis avaient déjà entraîné la mort de plus de 130 000 personnes en Indonésie, dont 19 000 au cours du xx^e siècle. Durant les 4 derniers siècles, les côtes indonésiennes auraient subi quelque 250 tsunamis (145 de ces événements étant plus particulièrement attestés et documentés), soit une moyenne d'environ 60 tsunamis par siècle (63 au xx^e siècle, 52 au xix^e siècle et déjà 10 pour le xxi^e siècle). Au moins 35 % de ces tsunamis ont été meurtriers.

L'archipel indonésien s'étire d'ouest en est sur plus de 5 000 km, entre les latitudes 6° N et 10° S, à la charnière entre trois grandes plaques tectoniques. Globalement, les plaques australienne au sud et pacifique à l'est s'enfoncent sous la plaque eurasiatique (sur laquelle reposent presque toutes les îles). Ce schéma, très général, se complique lorsqu'on considère les nombreux accidents tectoniques secondaires, également sources de séismes tsunamigéniques, et qui scindent l'archipel en blocs (on parle aussi de microplaques). Les zones sismiques

sources de tsunamis sont donc proches des côtes, ce qui rend délicate la mise en place de politiques de réduction des risques. De plus, les nombreux volcans proches des côtes représentent des sources potentielles de tsunamis, également très difficiles à prévoir. Ces édifices volcaniques sont par définition instables et peuvent générer des tsunamis, sans être forcément actifs. L'éruption du Krakatau, dans le détroit de la Sonde en 1883, avait provoqué plusieurs tsunamis en quelques heures, causant la mort de 36 000 personnes à Sumatra et Java.

1.2. Quelques rappels sur les caractéristiques hydrologiques des tsunamis

Les caractéristiques hydrologiques des tsunamis dépendent du phénomène les initiant, de la profondeur du plancher océanique et de la morphologie côtière. Les termes utilisés pour décrire les caractéristiques hydrologiques des vagues océaniques sont applicables aux tsunamis. Ainsi, la longueur d'onde désigne la distance entre deux crêtes successives. Elle est en moyenne de 100 m pour les vagues océaniques mais peut dépasser 200 km pour les ondes d'un tsunami. L'amplitude correspond à la dénivellation entre la crête et le niveau normal de la mer. En pleine mer, elle reste généralement faible (< 1 m). Les ondes de tsunamis se propagent en pleine mer à des vitesses de plusieurs centaines de km/h (180 km/h pour le tsunami du 2 septembre 1992 au Nicaragua, 800 km/h pour le tsunami du 1^{er} avril 1946 entre l'Alaska et Hawaï, 800-900 km/h pour le tsunami du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien). La vitesse de propagation augmente avec la puissance de l'impulsion initiale (origine du tsunami) et avec la profondeur d'eau, mais diminue avec la rugosité du fond. Les tsunamis sont donc freinés brutalement dès qu'ils atteignent la plate-forme continentale, d'où une augmentation très forte de l'amplitude de la vague au contact avec la côte (Fig. 3). Il se produit alors un

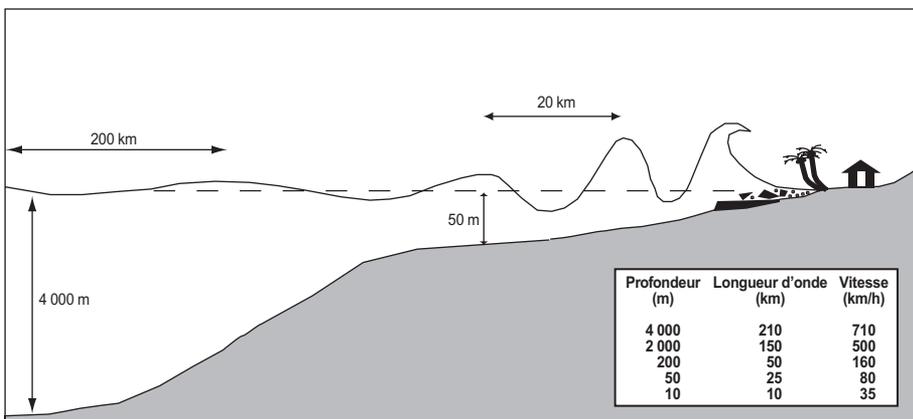


FIG. 3. Diminution de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation d'un tsunami en fonction de la profondeur d'eau.

transfert entre l'énergie cinétique déclinante et l'énergie potentielle grandissante. Des modalités de ce transfert dépendent les caractéristiques du tsunami à la côte, sa propagation dans les terres et sa capacité destructrice.

Les tsunamis sont classés en fonction de leur magnitude, qui correspond à l'énergie totale libérée par le tsunami. Plusieurs échelles de magnitude sont utilisées. Celle introduite par Imamura (1942) et développée par Iida (1956) est la plus simple et la plus pratique, mais elle ne prend pas en compte l'extension spatiale des tsunamis. Les six niveaux de magnitude (m) sont calculés à partir du logarithme (en base 2) de la hauteur maximum de la vague principale à la côte (H_{\max}) : $m = \log_2 H_{\max}$. D'après les premières estimations de hauteur des vagues, le tsunami du 26 décembre 2004 fut de magnitude 2 au Sri Lanka, en Thaïlande et en Inde, et de magnitude 3 à 4 sur la côte nord-ouest de Sumatra, située entre 50 et 250 km de l'épicentre.

1.3. L'impact environnemental des tsunamis

L'impact d'un tsunami sur l'environnement est à la fois d'ordre géomorphologique, hydrologique et biologique. Le rôle des événements catastrophiques, comme les tsunamis, les ouragans et les tempêtes, dans l'évolution morphologique et sédimentaire des milieux côtiers est un thème de plus en plus abordé dans la littérature scientifique (Dawson, 1994 ; Bryant *et al.*, 1996 ; Felton & Crook, 2003 ; Scheffers & Kelletat, 2003 ; Nott, 2004). Les grands tsunamis engendrent des crises géomorphologiques majeures car ils impliquent en quelques minutes une érosion côtière localement très accentuée (abrasion des platiers, érosion des falaises, recul des plages), une mobilisation et un dépôt dans les terres de sédiments sous-marins et littoraux. Cet impact s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres de côtes et jusqu'à plusieurs kilomètres dans les terres, dévastant ainsi plusieurs centaines de km^2 . Beaucoup de travaux ont déjà été réalisés sur les dépôts de sables et de blocs associés à d'anciens tsunamis, surtout sur les côtes proches des frontières de plaques convergentes (Tab. 2). L'identification et l'analyse de ces dépôts permettent de mieux comprendre les traces sédimentologiques laissées par les anciens tsunamis, de reconstituer leur étendue, de déterminer des intervalles de récurrence des séismes et d'estimer les risques de tsunami à l'échelle locale et régionale. C'est pourquoi les missions scientifiques post-tsunami sont nécessaires pour établir des liens entre les traces géomorphologique et sédimentaire des anciens tsunamis et les processus et formes observés à la suite d'un tsunami (Synolakis & Okal, 2005). De telles investigations, plus ou moins complètes, ont été menées lors des tsunamis de 1992 à Florès (Shi *et al.*, 1995 ; Minoura *et al.*, 1997) et au Nicaragua (Bourgeois & Reinhart, 1993 ; Satake *et al.*, 1993), de 1993 à Hokkaido (Nishimura & Miyaji, 1995 ; Sato *et al.*, 1995), de 1994 à Java Est (Dawson *et al.*, 1996 ; McSaveney *et al.*, 2000), de 1998 en Papouasie Nouvelle-Guinée (Gelfenbaum & Jaffe, 2003) et de 2001 au Pérou

Tab. 2. Principales publications sur les dépôts de sables et de blocs attribuables à d'anciens tsunamis (antérieurs à 1950). AD : Anno Domini (apr. J.-C.) ; BP : before present (= 1950) ; ka : milliers d'années.

Pays – région	Auteurs*	Âge du tsunami
Australie – côte sud-est	Bryant <i>et al.</i> (1996)	Pléistocène
Australie – côte sud-est	Bryant & Nott (2001)	Pléistocène
Australie – Grande Barrière	Nott (1997)	2 depuis 1 000 BP
Canada – Colombie-Britannique	Clague <i>et al.</i> (2000)	7 depuis 3 500 BP
Caraïbes – Antilles néerlandaises	Scheffers (2004)	3 500, 1 500 et 500 BP
Caraïbes – Bahamas	Hearty (1997)	120-75 ka
Caraïbes – Bahamas	Kelletat <i>et al.</i> (2004)	2 entre 3 000 et 500 BP
Chili – côte nord	Cantalamessa & Di Celma (2005)	Miocène
Chili – côte nord	Le Roux <i>et al.</i> (2004)	Pliocène
Chili – synthèse	Cisternas <i>et al.</i> (2005)	1575, 1737 et 1837 AD
Chypre	Kelletat & Schellmann (2002)	1700-1750 AD
Crète et Turquie	Minoura <i>et al.</i> (2000)	3 400 BP
Espagne – côte Atlantique	Whelan & Kelletat (2005)	1755 AD (Lisbonne)
Espagne – îles Canaries	Pérez Torrado <i>et al.</i> (2006)	800-700 ka
Espagne – synthèse côte sud	Luque <i>et al.</i> (2001)	2 300 BP
France – Polynésie – Tuamotu	Bourrouilh-Le Jan & Talandier (1985)	?
France – Polynésie – Tuamotu	Harmelin-Vivien & Laboute (1986)	?
Indonésie – détroit de la Sonde	Carey <i>et al.</i> (2001)	1883 AD (Krakatau)
Italie – côte Ionienne	Mastronuzzi & Sansò (2000)	1421-1568 AD
Italie – côte sud	Massari & D'Alessandro (2000)	Pléistocène
Italie – Stromboli	Tanner & Calvari (2004)	5 000 BP ?
Japon – Honshu centre	Fujiwara <i>et al.</i> (2000)	Holocène et 1923 AD
Japon – Honshu centre	Shiki & Yamasaki (1996)	Miocène
Japon – Honshu centre	Takashimizu & Masuda (2000)	Pléistocène supérieur
Japon – Honshu nord-est	Minoura & Nakaya (1991)	Holocène
Norvège	Bondevik <i>et al.</i> (1997)	7 000 BP
Nouvelle-Zélande – centre	Goff <i>et al.</i> (2004a)	xv ^e siècle
Nouvelle-Zélande – nord	Nichol <i>et al.</i> (2004)	660-510 BP
Nouvelle-Zélande – nord	Regnauld <i>et al.</i> (2004)	5 590-930 BP
Nouvelle-Zélande – sud	Goff <i>et al.</i> (2004b)	1826 AD
Nouvelle-Zélande – synthèse	Goff <i>et al.</i> (2001)	Holocène

Pays – région	Auteurs*	Âge du tsunami
Portugal – Algarve	Andrade (1992)	1755 AD (Lisbonne)
Portugal – Algarve	Dawson <i>et al.</i> (1995)	1755 AD (Lisbonne)
Portugal – Algarve	Hindson <i>et al.</i> (1996)	1755 AD (Lisbonne)
Royaume-Uni – Écosse	Dawson & Smith (2000)	7 600-7 200 BP
Royaume-Uni – îles Shetland	Bondevik <i>et al.</i> (2005)	3 entre 8 000-1 500 BP
USA – Hawaï – Lanai	Moore & Moore (1984)	110 ka
USA – Hawaï – Molokai	Moore <i>et al.</i> (1994)	240-200 ka
USA – Hawaï – Oahu	Noormets <i>et al.</i> (2002)	1946 AD
USA – État de Washington	Atwater (1987)	Holocène
USA – État de Washington	Shennan <i>et al.</i> (1996)	8 depuis 5 000 BP
USA – État de Washington	Williams <i>et al.</i> (2005)	9 depuis 2 500 BP

* Publications avant 2006

(Okal *et al.*, 2002 ; Jaffe *et al.*, 2003). Cependant, l'impact géomorphologique des tsunamis demeure peu documenté, de même que leur impact sur l'environnement en général. Seuls quelques auteurs ont tenté de corréliser les dépôts de tsunamis avec les formes et processus d'érosion (Andrade, 1992 ; Shi *et al.*, 1995 ; Bryant *et al.*, 1996 ; Bondevik *et al.*, 1997 ; Gelfenbaum & Jaffe, 2003).

Les effets biologiques des tsunamis sont pour l'instant peu documentés. L'action mécanique des vagues entraîne des destructions massives au sein des biocénoses néritiques, intertidales et littorales. Les récifs coralliens sont particulièrement sensibles aux tsunamis (ex. Hawaï, Indonésie, Polynésie), en raison de l'impact mécanique initial et des matières demeurant en suspension plusieurs semaines après l'événement. L'incursion d'eau salée dans les terres peut également être néfaste pour les cultures et pour certaines espèces ayant résisté au choc (ex. Florès 1992). Les tsunamis récents ayant frappé l'Indonésie (1992 et 1994) et la Papouasie-Nouvelle-Guinée (1998) ont montré le rôle protecteur de la mangrove, qui réduit l'impact mécanique des tsunamis ; ce que confirment les modèles analogiques (BPPT, 2004). Or, dans de nombreux pays d'Asie du Sud-Est, l'anthropisation galopante et la pression agricole menacent les mangroves du fait de l'exploitation de leurs ressources (bois de palétuvier), de l'augmentation des apports turbides liée à l'érosion accélérée des versants déboisés, et de l'implantation d'aquacultures (ex. crevettes). Dans de nombreuses régions, les marais maritimes ont été asséchés et poldérisés, et la mangrove a laissé place à de nouvelles terres agricoles, industrielles ou urbaines (ex. littoral de Banda Aceh, Sumatra). Enfin, le tsunami du Japon en février 2011 a dramatiquement illustré les risques secondaires liés aux activités industrielles à risque (ex. centrale nucléaires) et aux pollutions qui en découlent.

1.4. État des lieux sur la prévision et la prévention des tsunamis

Malgré les catastrophes retentissantes du XIX^e siècle (36 000 morts au Krakatau en 1883 et 26 000 à Honshu en 1896), il faudra attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour voir apparaître des publications scientifiques sur les tsunamis, sous l'impulsion des Japonais. Les tsunamis majeurs de ces dernières années (Nicaragua 1992, Flores 1992, Java 1994, Papouasie-Nouvelle-Guinée 1998, océan Indien 2004) ont eu un impact médiatique et scientifique important. Le Japon fait figure de leader, à la fois en matière de modélisation des tsunamis, de prévision et de protection des zones exposées. Seule l'aire Pacifique bénéficie actuellement d'un réseau de surveillance international. Les tsunamis de Hawaii en 1946 et du Chili en 1960 ont en effet précipité la création de l'International Tsunami Warning System (ITWS) et de l'International Tsunami Information Center (ITIC), dont l'objectif est de détecter, localiser et déterminer la magnitude des tsunamis d'origine sismique. Son organisation est basée sur des centres de surveillance régionaux, au rang desquels le Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, 26 États membres) est le plus actif. Ces centres sont administrés par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Honolulu) et bénéficient des données sismiques de l'U.S. Geological Survey (USGS). L'intérêt d'une collaboration internationale est de centraliser les données fournies en temps direct par un ensemble de stations sismiques, de marégraphes et un réseau de bouées flottantes détectant les variations de la pression de l'eau en profondeur (DART : Deep-Ocean Assessment and Reporting on Tsunamis). Les populations vivant à plus de 750 km de l'épicentre sont ainsi prévenues 1 heure avant l'arrivée du tsunami. Des systèmes d'alerte régionaux comme l'Alaska Tsunami Warning Center (ATWC), le French Polynesia Tsunami Warning Center (FPWC, Tahiti) ou le Tsunami Hazards Reduction Utilizing Systems Technology (THRUST, Valparaiso), ont été mis en place afin de donner l'alerte 10 à 12 minutes après un séisme, pour les populations situées entre 100 et 750 km. Au Japon, le système Ocean Bottom Seismograph (OBS) permet de détecter les séismes en pleine mer à l'aide de 180 sismographes, 103 marégraphes (dont 6 sont téléométrés) et de capteurs des variations de pression exercée par l'eau, à 2 200 m et 4 000 m de profondeur. Pour ce dernier système, les signaux générés par les marées et les signaux parasites qui modifient la pression de l'eau (changements de température) sont effacés à l'aide de filtres de différentes fréquences. Les données sont transférées par câble toutes les 20 secondes à des stations de surface, puis par téléphone au Tsunami Warning Center de la Japan Meteorological Agency (JMA, Tokyo). Au Japon, un séisme devient tsunamigénique à partir de 7 degrés sur l'échelle de Richter. Une magnitude de 7,5 entraîne généralement un tsunami de plusieurs mètres d'amplitude. Cas unique au monde, la prévention est fondée sur une modélisation numérique spatialisée de la propagation des ondes. À partir

de 4 000 sites de séismes sous-marins potentiels, plus de 100 000 cas scénarios de tsunamis ont été programmés. En cas de séisme, la recherche de la simulation la plus proche de la réalité s'effectue en seulement une minute trente. Les populations situées à moins de 100 km du séisme sont alertées 2 à 3 minutes avant l'arrivée du tsunami.

Le tsunami de Flores en décembre 1992 a joué un rôle moteur dans la sensibilisation des communautés politiques et scientifiques et entraîné une véritable prise de conscience des autorités indonésiennes. Les derniers tsunamis ayant frappé l'Indonésie (1996, 2004, 2006 et 2010) posent à la fois des problèmes scientifiques (ex. variations des hauteurs de vagues ; nombre de vagues différent suivant les endroits ; déferlement à la côte ou dans les terres), politiques et sociaux (manque de prévision et de prévention), et environnementaux. Le tsunami qui avait touché le sud de Java en 1994 avait déjà révélé des lacunes dans le domaine de la gestion et de la prévention du risque : télécommunications défaillantes, voies de communication en mauvais état, manque de matériel destiné aux réfugiés, distribution des vivres inégalement répartie, manque de prévention envers les populations et manque d'expérience des autorités. L'accent a été mis sur la surveillance sismique. Le réseau de sismographes TREMORS, créé en 1996 et géré par le BMG (Meteorological and Geophysical Agency), est opérationnel 24 h/24. La nouvelle du séisme du 26 décembre 2004 a été transmise instantanément aux autorités indonésiennes et a été diffusée sur une chaîne de télévision (Metro TV) 5 minutes avant l'arrivée du tsunami sur les côtes de Banda Aceh. L'Indonésie demandait depuis plusieurs années un système d'alerte, jugé alors trop coûteux. Mais c'est surtout l'absence de politique de prévention auprès des populations et d'aménagements des littoraux qui explique l'ampleur de la catastrophe. Trente-cinq pour cent des tsunamis ayant touché l'Indonésie ont causé des pertes humaines, contre 15 % seulement au Japon. Les travaux en matière de modélisation et de cartographie des risques, d'aménagement des littoraux et de prévention restent très limités en Indonésie et ne sont pas à la hauteur des risques encourus par ce pays.

1.5. Tirer les enseignements de la catastrophe du 26 décembre 2004

Le tsunami du 26 décembre 2004 a touché une dizaine de pays dont certains situés à plusieurs milliers de kilomètres de l'épicentre du séisme et causé la mort de plus de 280 000 personnes. C'est le tsunami le plus meurtrier et l'une des catastrophes les plus meurtrières de tous les temps. L'Indonésie a été le pays le plus affecté par ce tsunami (180 000 victimes à Sumatra, dégâts chiffrés à 2 milliards de dollars, plus de 300 km de côtes dévastés). Au-delà du retentissement médiatique, cet événement a confirmé un paradoxe crucial en matière de connaissance et de prévention du risque de tsunami : les apports scientifiques sont de plus en plus nombreux et l'explication physique du phénomène progresse sans cesse, alors

que les politiques de prévention sont la plupart du temps dérisoires et très inégales suivant les pays. Par ailleurs, les effets du tsunami sur la côte ouest de Sumatra, notamment l'impact géomorphologique, la destruction des écosystèmes (récifs coralliens, mangroves) et des cultures, ont mis en évidence le fait que la vulnérabilité n'est pas seulement socio-économique, mais aussi environnementale.

En tirant les enseignements de la catastrophe du 26 décembre 2004, une réponse de la communauté scientifique s'imposait, en démontrant l'intérêt d'une collaboration franco-indonésienne et d'une approche pluridisciplinaire des tsunamis pour les futurs travaux d'évaluation et de prévention des risques. Les objectifs du programme Tsunarisque répondent ainsi aux besoins et aux lacunes révélés par le tsunami du 26 décembre 2004 en croisant les approches scientifiques, pédagogiques et opérationnelles en matière de prévention des risques.

2. Naissance du programme et mise en place de l'équipe de Tsunarisque

2.1. Les prémices du programme avant même le tsunami de 2004

Le consortium franco-indonésien Tsunarisque est né de la volonté d'allier les activités de recherche, de formation et de prévention des tsunamis en Indonésie, ceci quelques mois avant la catastrophe du 26 décembre 2004. L'idée de travailler sur les tsunamis en Indonésie est initialement née de discussions au sein du laboratoire de géographie physique (LGP) de Meudon entre les deux futurs responsables du programme, Franck Lavigne et Raphaël Paris. Le premier est spécialisé dans les risques naturels en Indonésie, tandis que le second a travaillé dans les tsunamis aux Canaries dans le cadre de sa thèse de doctorat. L'idée initiale s'oriente sur 3 points :

- l'étude des dépôts de tsunamis, en particulier ceux liés à l'éruption du volcan Tambora à Sumbawa en 1815, qui fut la plus grosse éruption volcanique des 500 dernières années ;
- la cartographie de l'aléa et des risques par modélisation numérique sur la côte sud de Java, en particulier dans l'agglomération et le port de Cilacap. L'équipe prend alors contact début 2004 avec H. Hébert du CEA qui est séduite par le projet et accepte d'y participer ;
- la prévention des risques par l'information des populations côtières. L'association Planet Risk (représentée par sa présidente J. Morin), qui œuvre pour ce type d'actions, est partie prenante pour collaborer à ce projet.

L'ossature initiale de la future équipe Tsunarisque étant née, une partie de ses membres effectuent une première mission de repérage mi-décembre 2004, soit une dizaine de jours avant la catastrophe du 26 décembre. Les principaux responsables indonésiens impliqués dans la recherche sur les tsunamis ou dans la prévention des risques (BMG, ITB UGM) se sont rencontrés et acceptent de collaborer à ce projet, sans se douter alors de la suite tragique des événements.

2.2. Les missions de reconnaissance juste après le tsunami

Trois semaines après la catastrophe du 26 décembre 2004, F. Lavigne et R. Paris effectuent une première mission de reconnaissance à Aceh dans le cadre d'une mission internationale ITST (International Tsunami Survey Team), du 19 au 29 janvier 2005, coordonnée par l'UNESCO à Hawaii (Laura Kong). Cette mission comprenait des chercheurs japonais, américains et indonésiens. Elle avait permis de commencer une campagne de mesures (hauteurs et orientations des vagues) et d'entretiens visant à reconstituer de façon grossière le déroulement de la catastrophe et à jeter les bases de l'étude plus complète présentée dans Tsunarisque. Quelques semaines plus tard, à l'invitation de Mme Alliot-Marie, ministre de la Défense, et avec l'appui de la Marine nationale, P. Wassmer procède à plusieurs repérages aériens sur la côte sud d'Aceh (région de Meulaboh) à partir du porte-hélicoptère *Jeanne d'Arc*.

2.3. La mise en place de l'équipe Tsunarisque

À l'issue de ces missions de repérage, l'équipe de Tsunarisque se renforce avec l'arrivée de l'équipe montpelliéraine de GESTER pour l'étude des dommages et des problèmes de reconstruction, puis celle de J.-C. Gaillard (université de Grenoble) pour l'étude des aspects culturels. Au total, le projet TSUNARISQUE évolue vers un véritable consortium franco-indonésien à vocation pluridisciplinaire associant :

- 4 universités françaises (Paris-I, Clermont-II, Paris-VII, Grenoble-I) et 4 UMR (Unités mixtes de recherche) du CNRS (LGP, Géolab, Prodig, Territoires) ;
- un organisme public français de recherche et de prévention des risques (CEA) ;
- une association loi 1901 française (Planet Risk) ;
- une université indonésienne associée à un centre de recherche (UGM) ;
- un organisme public indonésien de recherche et de prévention des risques (BMG).

Un gros projet est soumis et accepté en mai 2005 par la Délégation pour l'aide aux pays touchés par le tsunami (DIPT) avec le soutien de l'ambassade de France en Indonésie. Le budget alloué permet d'investir dans du matériel de mesure performant – dont une grosse partie offerte à nos partenaires indonésiens d'UGM et du BMG –, puis d'effectuer 5 missions de terrain d'une quinzaine de personnes en moyenne, d'août 2005 à février 2006 (comptes rendus et bases de données en français, anglais et indonésien disponibles sur le site Web de Tsunarisque : <http://www.tsunarisque.cnrs.fr>). L'ensemble des membres ayant participé au programme, avec leurs coordonnées, figure en fin d'ouvrage.

3. Objectifs et méthodologie pour une étude intégrée des risques de tsunamis

L'objectif du projet Tsunarisque s'oriente autour de 4 grands axes :

- la reconstitution du tsunami du 26 décembre 2004 dans la région de Banda Aceh ;
- l'étude et la cartographie des impacts environnementaux, économiques, sociaux et culturels du tsunami ;
- la modélisation et la cartographie des risques de tsunamis en Indonésie ;
- des actions spécifiques de prévention auprès des populations (sensibilisation aux risques).

L'organigramme du programme (Fig. 4) souligne la volonté de combiner des missions de terrain et une modélisation numérique dans le but d'améliorer les modèles hydrauliques existants pour mieux comprendre l'impact d'un tsunami à la côte et dans les terres, et proposer une cartographie de l'aléa et du risque le long de la côte.

Le premier chapitre de cet ouvrage est consacré à la reconstitution du tsunami dans toute sa complexité. Il vise à montrer l'intérêt d'associer quatre approches, qui sont le plus souvent utilisées par des chercheurs de disciplines différentes :

- la télédétection, grâce à des photographies aériennes détaillées et des images satellites à haute résolution ;

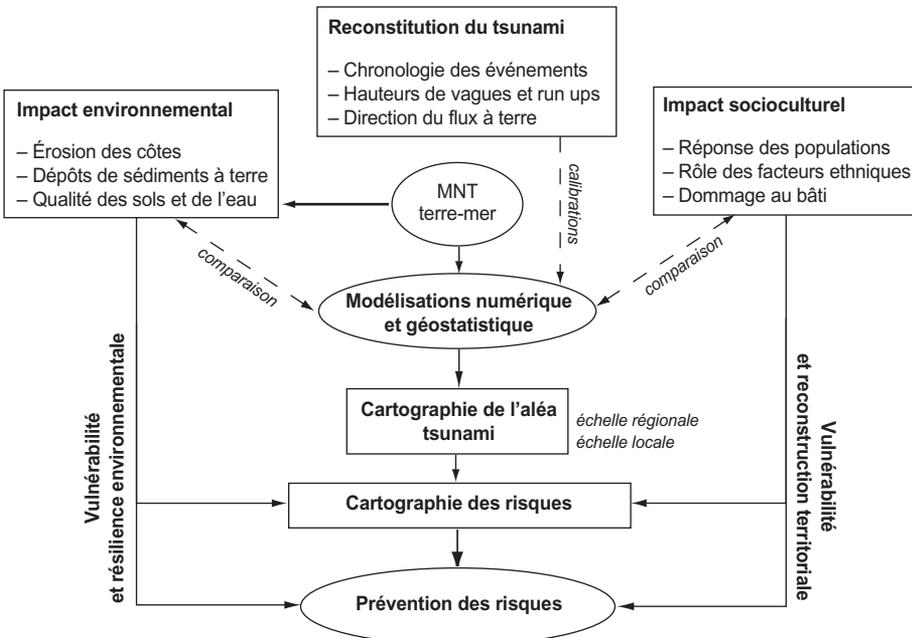


FIG. 4. Méthodologie globale du programme Tsunarisque.

- les relevés de terrain, effectués à l'aide d'outils perfectionnés (topographie, bathymétrie, hauteurs de vagues, orientations, analyse des destructions, etc.) le plus souvent par des géomorphologues ;
- les enquêtes auprès des survivants du tsunami, approche plus géographique, d'un intérêt majeur pour reconstituer une chronologie précise de l'événement ;
- des modélisations, qu'elles soient numériques ou statistiques.

L'étude chronologique et la reconstitution détaillée de la catastrophe a été réalisée en premier lieu à partir des données récoltées sur le terrain lors des 4 missions de 2005 (Lavigne *et al.*, p. 27). La deuxième contribution propose une modélisation géostatistique originale des directions de vagues – à partir des relevés de terrain – par le code FlowDGeos (Grancher *et al.*, p. 49), une approche complémentaire de la modélisation numérique, présentée dans le troisième article (Hébert *et al.*, p. 59), qui est confrontée aux données de terrain. Les apports et les limites de la modélisation sont ainsi mis en valeur. Dans le quatrième article, nous présentons une analyse spatiale des dommages au bâti à Banda Aceh. Cette étude a permis de mettre en place la première échelle d'intensité des tsunamis à partir de fonctions de pertes, qui ont pour objectif l'élaboration de scénarios de risque tsunami (Leone *et al.*, p. 77).

Les travaux présentés dans le chapitre 2 viennent combler des lacunes concernant la connaissance de l'impact environnemental des grands tsunamis, notamment de leur impact géomorphologique. La première contribution traite des formes d'érosion engendrées par le tsunami et de l'estimation du recul du trait de côte et des volumes emportés à Lhok Nga, baie située à l'ouest de Banda Aceh, à partir de relevés de terrain et d'images satellites (Paris *et al.*, p. 99). L'érosion engendrée par le tsunami a alimenté une sédimentation sous la forme de dépôts sableux, qui sont étudiés en détail par Paris *et al.* (p. 111). Une troisième contribution se concentre sur des dunes érodées par le tsunami et les dépôts de sable à partir de relevés au radar géologique, cet outil n'ayant jamais été utilisé auparavant sur des formes d'érosion et de dépôts associés à un tsunami (Gomez *et al.*, p. 127). La contribution suivante se focalise sur l'accumulation de blocs parfois plurimétriques déposés par le tsunami dans le même secteur de Lhok Nga (Barthomeuf *et al.*, p. 137). Les aspects géomorphologiques sont abordés également sur la côte nord-est de Banda Aceh, où Wassmer *et al.* (p. 145) envisagent les transferts sédimentaires associés au tsunami sur l'instantané, mais aussi durant les mois qui ont suivi le tsunami. Enfin, un dernier article traite de l'impact du tsunami sur la qualité des sols et des eaux phréatiques (Sartohadi *et al.*, p. 163).

L'impact économique, social et culturel des plus grands tsunamis peut se traduire par l'anéantissement de sociétés organisées à l'échelle régionale, comme cela s'est produit dans le passé en Méditerranée (Santorin) et probablement en Indonésie. L'intérêt économique d'un site, à l'échelle vivrière ou industrielle,

exposé au risque conditionne en partie la rapidité de sa recolonisation post-tsunami et de la reconstruction d'infrastructures, à l'instar des cultures fertiles implantées sur les cendres volcaniques en Indonésie ou aux Philippines. Mais les facteurs ethniques et culturels entrent aussi en jeu dans la réponse des populations face aux risques, comme le montre le premier article du chapitre 3 (Gaillard *et al.*, p. 177). Au lourd bilan de la catastrophe s'ajoute la situation de la province d'Aceh, appauvrie et socialement affaiblie par des années de conflit armé, vivant encore dans l'état d'urgence civil au moment de la catastrophe. Si le contexte politique et socio-économique a influencé la réponse des populations à la catastrophe, il a aussi conditionné la gestion de l'urgence et de la reconstruction (voir Clavé *et al.*, p. 199, et Cattedra *et al.*, p. 213). Les enjeux et modalités spatiales de la reconstruction post-tsunami sont ensuite abordés à travers 4 axes d'évaluation (Vinet *et al.*, p. 233) : la mise en évidence des structures territoriales de la reconstruction à l'échelle locale, la question foncière, la prise en compte des aléas naturels et l'adéquation des programmes de reconstruction. Enfin, un ultime article (Morin *et al.*, p. 271) fait état des actions préventives menées par l'association Planet Risk sur la côte sud de Java, également menacée par les tsunamis. Ces actions s'inspirent des enseignements tirés par les articles précédents et reposent sur la réalisation d'un film de prévention, de posters et de brochures diffusés dans le cadre d'une exposition itinérante et d'un centre permanent de sensibilisation aux tsunamis.