



Tsunami du Chili 2010 : destruction du système littoral et retour vers un équilibre sédimentaire ?

Mauricio VILLAGRAN¹, Rodrigo CIENFUEGOS¹, Rafael ALMAR²,
Patricio CATALAN³, Andres CAMANO⁴

1. Depto. Ing. Hidraulica y Ambienta Pontificia Univ. Católica de Chile (DIHA-PUC), Santiago, Chili. *mvillagranv@uc.cl; racienfu@ing.puc.cl*
2. IRD-UMR LEGOS (UPS-CNRS-IRD-CNES), Toulouse, France. *rafael.almar@ird.fr* (auteur correspondant)
3. Universidad Técnica Federico Santa Maria (UTFSM), Valparaiso, Chili. *patricio.catalan@usm.cl*
4. Arauco, Chili. *Andres.Camano@arauco.cl*

Résumé :

Le 27 février 2010, un mégaséisme de magnitude 8.8 au large du Chili a généré un tsunami qui a atteint des hauteurs de 10 m sur les côtes chiliennes. Les conséquences humaines et environnementales ont été lourdes. Nous détaillons ici les observations qui ont été réalisées d'abord ponctuellement pour évaluer l'impact du tsunami sur la morphologie littorale et ensuite sur la reconstruction naturelle au moyen d'un suivi bimensuel. Les relevés montrent que le littoral a subi une nette érosion associée à la destruction des structures sableuses (barres, plages, dunes). La réponse du littoral a ensuite été rapide (~mois) avec la reconstruction de la plupart des structures, avec cependant des évolutions vers des états souvent différents de ceux observés antérieurement au tsunami. En particulier, pour expliquer cette différence, les effets du changement d'élévation terrestre sur la zone et le déficit fluvial sont supposés avoir joué un rôle prépondérant. Les observations suggèrent que la dynamique de la flèche sableuse du rio Mataquito est particulièrement sensible à ces réajustements. Ces résultats sont riches d'enseignements, en particulier en considérant les effets tectoniques sur le littoral, notamment dans le cadre des échelles de temps des effets liés au changement climatique.

Mots-clés :

Tsunami du Chili 2010 – Séisme – Embouchure dominée par l'effet des vagues – Flèche sableuse – Risque côtier – Changements morphologiques – Tectonique – Mataquito, littoral central, Chili

1. Introduction

Le 27 février 2010 à 3h34 (heure locale), un mégaseisme de magnitude 8.8 est survenu au large de la côte centrale du Chili, à 300 km au sud de Santiago (FRITZ *et al.*, 2011). Le séisme et le tsunami ont causé d'importants dégâts matériels et des pertes humaines.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

La majorité des 521 victimes est attribuée au séisme et 124 au tsunami. En plus des conséquences humaines, l'impact du tsunami sur la biologie et la morphologie littorale a été très important. L'impact des tsunamis sur la morphologie en général, et celui du Chili en particulier, reste cependant très peu documenté (CIENFUEGOS *et al.*, 2010).

De par son énergie, un tsunami agit comme un bulldozer sur les structures littorales en les détruisant. Ceci représente alors un cas d'étude unique pour comprendre la formation de ces structures après une remise à zéro. Face à cet événement unique, se posent alors les questions scientifiques suivantes : est-ce que les structures sédimentaires se reforment après leur destruction ? quel est le temps de réponse du système littoral et quelle est sa capacité à se reformer naturellement ?

Lié à ce séisme, l'élévation terrestre sur la côte a changé entre -1 et +3 m (VIGNY *et al.*, 2011). Cette situation est extrêmement intéressante car elle correspond à l'effet qu'aurait une élévation du niveau des mers sur plusieurs décennies prévue dans le cadre du changement climatique. En relation avec la modification de l'élévation du sol, les questions scientifiques sont : le système littoral peut-il s'adapter à une variation conséquente du niveau des mers (ndlr ou changement du niveau terrestre) ? le système littoral revient-il à l'équilibre pré-tsunami ou évolue-t-il vers un autre état ? de plus, se pose la question de la prise en compte des effets tectoniques face à la variation du niveau des océans (BALLU *et al.*, 2011).

Pour la première fois, l'impact géomorphologique d'un tsunami sur le littoral est observé et décrit. Les résultats de cette étude réalisée dans un "laboratoire" naturel unique sont riches d'enseignements scientifiques majeurs, notamment sur la dynamique du littoral soumis à des événements géologiques extrêmes, et permettent de mieux anticiper les conséquences d'un réchauffement climatique sur le littoral.

2. Site d'étude et données

2.1 L'embouchure de Mataquito, zone centrale du Chili

Le site d'intérêt est l'embouchure de la rivière Mataquito (Licanten) dans la région du Maule, à 300 km au sud de Santiago du Chili et 100 km au nord de la ville de Concepcion (figure 1). Le climat est marqué par une forte variabilité saisonnière, avec des étés secs et des hivers pluvieux. Deux types de rivières sont présents dans la zone centrale chilienne : les premières prennent naissance dans la cordillère des Andes (4000-6000 m) et les secondes dans la cordillère de la côte (1000-2500 m). Alors que les premières bénéficient d'un apport d'eau tout au long de l'année, les rivières "de la côte" présentent une forte saisonnalité et le plus souvent s'assèchent en été. Une des plus grosses différences entre ces deux types de rivières est leur embouchure alors que les rivières andines présentent généralement une barre/flèche sableuse ouverte sur l'océan, les embouchures des rivières de la côte sont dominées par des décharges sédimentaires ponctuelles et des lagunes côtières qui se ferment en période d'étiage. L'embouchure du

rio Mataquito est représentative des rivières andines (CIENFUEGOS *et al.*, sous presse). Les houles, principalement de sud-ouest, sont énergétiques avec une hauteur moyenne annuelle de 2.5 m (CIENFUEGOS *et al.*, 2010). Le marnage est micro-tidal et l'environnement littoral est dominé par l'effet des vagues. La pointe sableuse accompagnant la sortie du rio Mataquito dans l'océan est donc orientée vers le nord, dans le sens de la dérive littorale. Avant le tsunami, la sortie sur l'océan était située à l'extrémité nord de la pointe et sa dérive menaçait la zone urbaine de la Pesca. Des travaux d'aménagement côtiers (enrochements, digue) avaient donc été entrepris pour fixer cette sortie.

Le sédiment est fin, de diamètre moyen compris entre 0.2 et 0.35 mm. L'apport sédimentaire dans la zone se fait principalement grâce à la présence de l'importante rivière andine Maule, à Constitución, située à 15 km en amont de la dérive littorale. Le Mataquito est également une source ponctuelle de sédiment. Le système présente un équilibre sédimentaire depuis plusieurs années.

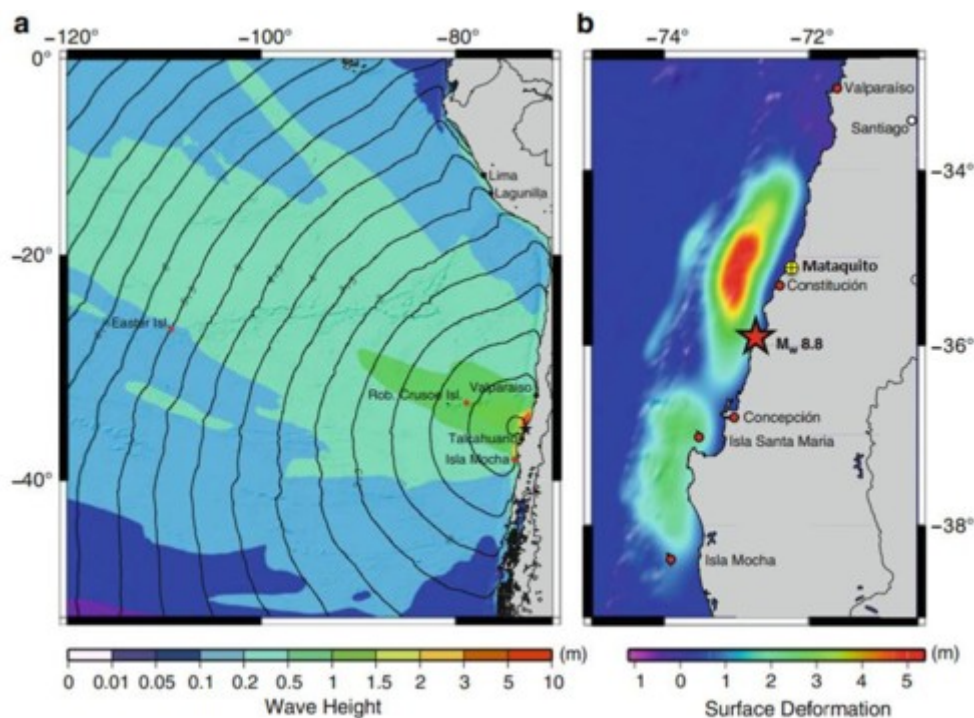


Figure 1. Propagation à grande échelle du tsunami (à gauche). Déformation de surface initiale (à droite). D'après FRITZ *et al.* (2011).

2.2 Séisme et tsunami du 27 février 2010

L'épicentre du séisme (35.909°S, 72.733°W) était situé à 105 km au nord-ouest de la ville de Concepcion (figure 1). La zone de rupture comprend une surface de l'ordre de 600 km dans la direction nord-sud et 300 km dans la direction est-ouest (National Earthquake Information Center of the USGS). En moyenne, le glissement du fond a

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

atteint 5 m. Ce mouvement du fond marin a généré un tsunami massif qui s'est propagé vers la côte centrale chilienne ainsi que dans tout le Pacifique (figure 1). Deux zones principales de déplacement ont provoqué une forte hétérogénéité dans la hauteur du tsunami créant des points de focalisation d'énergie à la côte (FRITZ *et al.*, 2011).

Le tsunami généré a atteint une hauteur maximale de 15 m à proximité de l'embouchure du rio Mataquito. La variabilité spatiale du tsunami a été très importante le long de la côte, avec une hauteur d'inondation moyenne de 5 à 10 m sur les 600 km de côte faisant face à la zone de rupture. Trois vagues principales ont été observées même si l'effet local de la bathymétrie a joué un rôle important dans la sélection en fréquence. Les observations ont montré la prédominance de 2 fréquences (CARRION *et al.*, 2010), une de l'ordre de l'heure et une autre de l'ordre de 20 minutes. Plusieurs heures après le passage de la première vague, certaines zones étaient encore frappées par des vagues secondaires de type ondes de bord (RABINOVICH *et al.*, 2006).

2.3 Mesures terrain

Moins d'une semaine après le passage du tsunami, une équipe internationale a été déployée pour décrire l'impact du tsunami sur 800 km de côte (CIENFUEGOS *et al.*, 2010 ; FRITZ *et al.*, 2011). Le relevé inclut plus de 400 mesures de hauteurs d'inondation et profils topographiques. Les mesures ont été réalisées grâce au couplage de théodolites (hauteurs) et GPS manuels (positions).

Depuis, une équipe de l'Université Catholique du Chili (Departamento de Ingenieria Hidraulica y Ambiental) suit avec une fréquence bimensuelle la réponse du système littoral et sa reconstruction naturelle. Ce suivi est réalisé au moyen de relevés topographiques, imagerie satellitale et photos aériennes. Les images aériennes sont géoréférencées pour un suivi quantitatif.

3. Résultats et Discussion : évolution morphologique

3.1 Effet immédiat : impact morphologique du tsunami

Les observations montrent que le tsunami a provoqué une remise à zéro totale des structures sableuses littorales, détruisant les barres sableuses immergées et les dunes et ouvrant les embouchures fluviales fermées lors de cette fin d'été. La dynamique sédimentaire a été très intense, dépassant en un jour l'ordre de grandeur de la variabilité naturelle du système. Par exemple, la flèche sableuse (10 km de long, 2 m de haut) présente à l'embouchure du rio Mataquito a partiellement disparu (figure 4). Des dunes non végétalisées ont été largement érodées. Dans certaines baies, les courants associés au tsunami (mesurables par les traces laissées dans la végétation) ont déplacé des quantités de sédiment de la plage vers l'intérieur. Des falaises d'érosion sont apparues sur la plupart des côtes sableuses et des rochers auparavant enfouis sont apparus sur les plages. Ceci indique une érosion nette sur l'ensemble du littoral de plusieurs dizaines de

centimètres et représente un volume de sédiment mobilisé et déplacé au large considérable. Une quantification de cette perte de sédiment est toutefois difficile de par l'absence de données antérieures au tsunami sur cette zone.

3.2 Reconstruction naturelle : réajustement du système sédimentaire littoral

Une quantité importante de sédiment avait été déplacée au large. Les relevés des mois qui ont suivi le tsunami (avril et septembre) ont montré que ce sédiment a rapidement été mobilisé et ramené à la côte. Bien que ralentissant, les processus observés durant ces premiers mois se sont poursuivis par la suite. En particulier, des embouchures qui s'étaient ouvertes lors du tsunami se sont refermées et ont présenté des engraissements importants avec souvent un retour aux niveaux pré-tsunami (*e.g.* Bucalemu, perte puis engraissement vertical de 1.5 m, figure 2). Le comportement sédimentaire de la zone située dans les 10 km au nord de l'embouchure du Mataquito est complexe. La baie de Duao (figure 3) subit une érosion marquée (-200 m de plage par an) et les infrastructures côtières sont menacées : destruction de l'école municipale, déplacement du port artisanale, construction d'enrochement. Proche de l'embouchure et à 8 km au sud de Duao, la zone de La Pesca (premier plan des images, figure 5) au contraire, présente un engraissement de plusieurs centaines de mètres de plage, qui ont d'ors et déjà enseveli les anciens enrochements artificiels de protection.

Il est intéressant de noter que ces deux zones ont été affectées de manière identique par un affaissement du niveau terrestre de -80 cm (VIGNY *et al.*, 2011; VARGAS *et al.*, 2011, figure 3). Une hypothèse expliquant ces comportements contrastés est de supposer que la plage de La Pesca s'est engraisée grâce au sédiment disponible en amont de la dérive littorale, dans une partie de dunes sableuses, rendu mobilisable grâce à l'affaissement terrestre. Toutefois, une étude granulométrique n'a pas montré de relation significative dans ce sens. La question reste ouverte.

Les conséquences sociétales et économiques de cette évolution contrastée sont majeures. En effet, l'attraction touristique de Duao était auparavant une plage très étendue qui n'existe plus aujourd'hui (figure 3). De plus, le maintien artificiel du trait de côte est coûteux et nécessite des actions régulières.

3.3 Description spécifique de l'évolution de l'embouchure de Mataquito

Comme nous l'avons décrit précédemment, la flèche sableuse de Mataquito a été détruite lors du tsunami (figure 2). La côte est ensuite restée exposée à l'érosion par les vagues. Par la suite, la reconstruction de la flèche sableuse a été rapide, s'étendant de sa base au sud vers le nord (figure 5). La sortie active est restée immobile à mi-longueur de la barre, alors que sa sortie pré-tsunami se refermait au nord.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire



Figure 2. Photos prises immédiatement après le tsunami en mars 2010 et en janvier 2011. La barre sableuse s'est reformée.



Figure 3. Baie de Duao, à 8 km au nord de Mataquito immédiatement après le tsunami en mars 2010 et un an plus tard en janvier 2011. La plage s'est érodée d'environ 200 m, des enrochements sont mis en place.

Nous avons cherché une explication à cette évolution en étudiant le forçage de ce type de barre d'embouchure (COOPER, 2001), principalement le débit fluvial et la houle, l'impact de la marée restant négligeable ici. Sur un an, les mesures montrent que les caractéristiques de houles sont proches de la climatologie, énergiques avec une incidence sud-ouest. En revanche, le débit du Mataquito est resté plus faible ($500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) que les années précédentes (moyenne de $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur 34 ans, source DGA-Chile) avec une année anormalement sèche sur la zone centrale du Chili. Ceci laisse envisager que l'évolution de la flèche durant cette période a été principalement influencée par la houle. Il est raisonnable de penser que cette évolution aurait été différente avec un débit fluvial plus important, avec une sortie logiquement située au nord de la flèche sableuse.

Des données quantitatives seront apportées ces prochaines années par la réalisation d'observations complémentaires à Mataquito dans le cadre d'un projet Fondecyt.



Figure 4. Evolution morphologique de l'embouchure du rio Mataquito d'avril 2010 à septembre 2011. La flèche a progressé vers le nord et l'ouverture sur l'océan est restée à mi-longueur (4 km de la pointe). Au premier plan (enrochement), la communauté de La Pesca.

4. Conclusions

Cette étude décrit l'impact du tsunami du 27 février 2010 sur la côte chilienne, et en particulier, la zone de l'embouchure du rio Mataquito située à 300 km au sud de Santiago. L'effet d'évènements tectoniques (séisme, tsunami) sur la morphologie littorale restait jusqu'à présent peu documenté. Les observations issues d'un relevé post-tsunami montrent que l'impact immédiat a été très important, caractérisé par une forte mobilisation de sédiment (destruction des structures sableuses) et une nette érosion. Durant l'année qui a suivi le tsunami, les structures littorales se sont reconstruites rapidement (~mois) en évoluant vers des états d'équilibres souvent différents de ceux observés préalablement au tsunami. Les cas identifiés les plus marquants sont : (i) une barre sableuse à Bucalemu qui est revenue à l'identique, (ii) des plages voisines qui ont des évolutions contrastées de forte érosion (-200 m) ou d'engraissement (+300 m) et enfin (iii) la flèche sableuse de Mataquito qui s'est refermée à la position de l'ancienne ouverture sur l'océan. Ceci peut être attribué à la variation de l'élévation terrestre (-80 cm dans la zone) et à un déficit de débit fluvial dû à une année relativement sèche. Ces observations montrent que les conséquences sociétales et économiques ainsi que sur l'environnement côtier sont très importantes. Finalement, cette étude suggère que l'effet de la tectonique sur le littoral peut être important, et ceci est à considérer dans le cadre des évolutions aux échelles de temps associées au changement climatique.

Remerciements :

Ces travaux de recherche bénéficient du soutien financier des projets FONDECYT N° 3110030 et 1120878.

5. Références bibliographiques

BALLU V., BOUIN M.-N., SIMEONI P., CRAWFORD W.C., CALMANT S., BORE J.-M., KANAS T., PELLETIER B. (2011). *Comparing the role of absolute sea-level rise and vertical tectonic motions in coastal flooding, Torres Islands (Vanuatu)*. PNAS 2011 108 (32), pp 13019-13022. doi:10.1073/pnas.1102842108

CARRIÓN B., ALMAR R., CIENFUEGOS R., BURGOS L., CATALÁN P. (2010). *Modelo numerico de la propagacion del tsunami del 27 de febrero de 2010: analisis preliminar del comportamiento hidrodinamico del evento*. Journal of Chilean Hydraulics Engineering Society. 25(1), pp 7-20.

CIENFUEGOS R., CAMPINO J.-R., GIRONÁS J., ALMAR R., VILLAGRÁN M. (sous presse). *Desembocaduras y Lagunas Costeras en la Zona Central de Chile*. In Humedales Costeros de Chile, J.M. Fariña y A. Camaño, Eds, SOCHID, Chili.

CIENFUEGOS R., CATALÁN P., WINCKLER P., CONTRERAS M., ALMAR R., DOMINGUEZ J.C., FRITZ H., PETROFF C., KALLIGERIS N., WEISS R., MENESES G., EBELING C., PAPADOPOULOS A., BARRIENTOS S., SYNOLAKIS C., (2010). *Observations on morphological changes by the impact of the February 27, 2010 tsunami along the coastline of V-VI-VII Regions*. AGU Chapman Conference on Giant Earthquakes and Their Tsunamis, Vina del Mar, Chile.

COOPER J.A.G. (2001). *Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South Africa coast*. Geomorphology, 40, pp 99-122. doi:10.1016/S0169-555X(01)00039-3

FRITZ H.M., PETROFF C.M., CATALAN P.A., CIENFUEGOS R., WINCKLER P., KALLIGERIS N., WEISS R., BARRIENTOS S.E., MENESES G., VALDERAS-BERMEJO C., ALMAR R., DOMINGUEZ J.C., SYNOLAKIS C.E. (2011). *Runup variability of the 27 February 2010 Chile tsunami*. Pure and Applied Geophysics

RABINOVICH A.B., STEPHENSON F.E., THOMPSON R.E. (2006). *The California tsunami of 15 June 2005 along the coast of North America*. Atmosphere-Ocean, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 44, pp 415-427.

VARGAS, G., FARÍAS, M., CARRETIER, S., TASSARA, A., BAIZE, S., MELNICK, D. (2010). *Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile*. Andean Geology. 38(1), pp 219-318.

VIGNY C. SOCQUET A. PEYRAT S., *et al.* (2011). *The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS*, Science, 332, pp 1417. doi:10.1126/science.1204132

Villagran M., Cienfuegos R., Almar Rafael, Catalan P., Camano A. (2012)

Tsunami du Chili 2010 : destruction du système littoral et retour vers un équilibre sédimentaire ?

Nantes : Paralia, 541-548

Journées Nationales Génie Côtier

Génie Civil , 12, Cherbourg (FRA), 2012/06/12-14