

Séisme du Chili

du samedi 27 février 2010 (6h34 TU)
Magnitude = 8,8

Version 3 du 7 avril 2010

Le Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations (BERSSIN) de l'IRSN effectue des recherches et des expertises sur l'aléa sismique en tant que source d'agression externe des installations à risque

Rappel des faits

- Samedi 27 février 2010, à 6h34 TU (3h34 heure locale), un séisme de très forte magnitude (Mw 8,8 - source USGS) s'est produit dans la région du Maule au centre du Chili (figure 1). Localisé à une latitude de 35,85° Sud et à une longitude de 72,72° Ouest, son foyer était situé à environ 6 km au large de la ville côtière de Constitución. Sa profondeur est estimée à environ 35 kilomètres (USGS).
- Le séisme a provoqué un tsunami qui s'est propagé dans le Pacifique et a gravement affecté les côtes chiliennes. Les eaux se sont élevées en moyenne de 2 à 3 mètres et localement jusqu'à 13 mètres (page 5). Ailleurs dans le Pacifique, cette amplitude a atteint jusqu'à 1,5 mètre au Japon, 4 mètres aux îles Marquises, 3 mètres aux îles Samoa et 2 mètres sur les côtes de l'île de Sakhaline en Russie (Source : NOAA).
- Selon le bilan revu à la baisse par les autorités le 19 mars 2010, le séisme a fait 452 morts et 96 disparus. Il a provoqué des dégâts très importants à près de 500 000 maisons et aux infrastructures (écoles, hôpitaux et ouvrages d'art, installations portuaires) notamment dans les villes de Chillan, Concepción et Talca, situées à une centaine de kilomètres de l'épicentre. La capitale Santiago du Chili (à 325 kilomètres de l'épicentre) a tremblé pendant près d'une minute et demie et a également subi des dégâts notables. Le nombre de personnes affectées s'élève ainsi à 2 millions. La secousse a été ressentie en Argentine, en Uruguay, au Paraguay et au Brésil.
- Plus de 400 répliques de magnitude supérieure à 4,5 ont été enregistrées en un mois, dont 90 au cours des premières 24 heures (figure 1). Les deux répliques les plus fortes (magnitude 6,9) se sont produites le 27 février et le 11 mars.
- Le séisme s'est produit dans une zone où l'aléa sismique est l'un des plus élevés au monde. La connaissance de cet aléa et la mise en œuvre de normes de construction parasismique ont contribué à limiter les destructions et les pertes humaines.
- L'IRSN a participé à la mission post-sismique franco-chilienne qui s'est déroulée du 3 au 18 mars. Les instruments déployés et les observations de terrain permettront d'étudier plus finement le séisme et ses effets. L'Association Française du génie Parasismique prépare actuellement une mission qui aura lieu du 8 au 16 avril et sera dédiée à l'analyse des dégâts aux constructions.

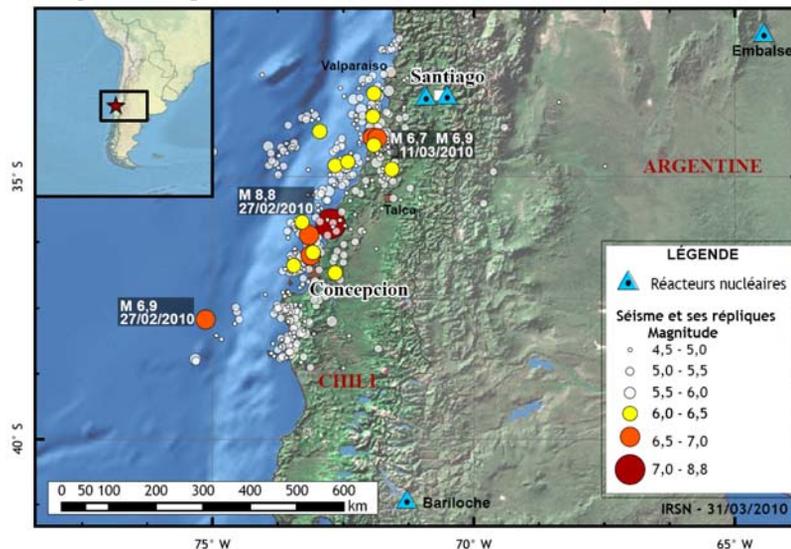


Figure 1 : Localisation du séisme chilien du 27 février 2010 et de ses répliques au 29 mars 2010.

CONTACT :
IRSN/BERSSIN
Christophe Clément/Hervé Jomard/Stéphane Baize
01 58 35 76 65
01 58 35 73 78
christophe.clement@irsn.fr
herve.jomard@irsn.fr
stephane.baize@irsn.fr
www.irsn.fr

Contexte sismotectonique

Le Chili est situé dans la partie méridionale de la Cordillère des Andes dont la formation résulte du glissement (ou subduction¹) du plancher océanique pacifique (plaque de Nazca) sous la plaque continentale sud-américaine (figure 2). La longueur de la zone de subduction (plusieurs milliers de kilomètres) et la vitesse de convergence entre les deux plaques (de l'ordre de 8 cm/an selon une direction OSO-ENE) sont à l'origine des fréquents et violents séismes qui affectent cette région (figure 3). Le glissement relatif des deux plaques conduit en effet à une accumulation d'énergie élastique le long du plan de faille jusqu'à atteindre un seuil de rupture. C'est cette rupture et le mouvement qui l'accompagne qui sont à l'origine des séismes. Ceux-ci sont d'autant plus violents que l'énergie accumulée est grande et que la rupture concerne une longueur de faille importante. Le séisme de Valdivia de 1960 (Mw 9,5) a mobilisé plus de 1 000 km du plan de subduction ; il reste le plus fort séisme enregistré à ce jour dans le monde.

L'épicentre du séisme du 27 février 2010 est localisé entre la zone de rupture du séisme de 1960 et celle des séismes de Valparaiso de 1906 et de 1985 (figure 3). La région concernée (région de Concepción) n'avait pas connu de séisme notable depuis 1835 et était de ce fait considérée comme une lacune sismique² par plusieurs sismologues (e.g. : Campos et al., 2002 ; Ruegg et al., 2009).

Les répliques localisées sur la côte chilienne présentent une distribution géographique étendue sur environ 600 km du Nord au Sud. Cette distribution souligne l'extension maximale du plan de faille mobilisé lors du choc principal. Sa dimension est cohérente avec la magnitude 8,8 calculée à partir des enregistrements sismologiques mondiaux.

(1) Processus au cours duquel la plaque tectonique la plus dense s'enfonce sous celle de plus faible densité.

(2) Une lacune sismique (en anglais: gap) désigne une région réputée sismique mais dans laquelle ne s'est pas produit de séisme depuis un temps significatif et où, par conséquent, l'accumulation des contraintes sur les failles conduit à considérer plus probable l'occurrence du « prochain séisme »

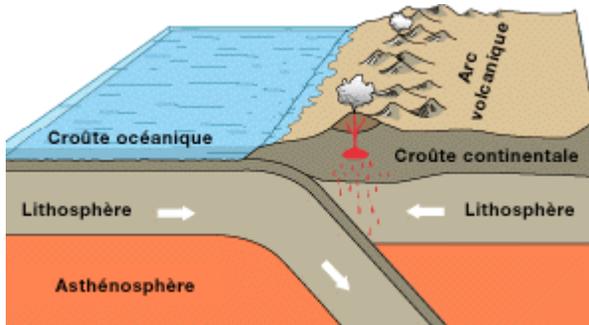


Figure 2 : Subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale

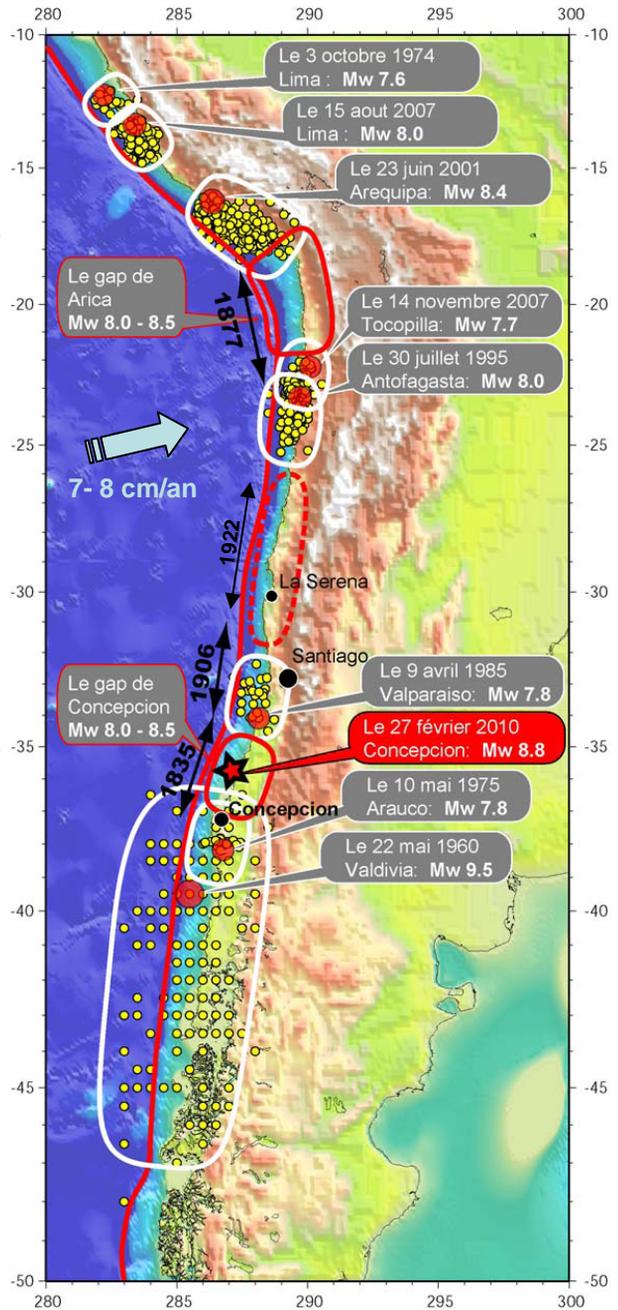


Figure 3 : Zones de rupture des principaux séismes de la subduction chilienne (d'après Ch. Vigny, ENS).

Mouvements sismiques enregistrés

Le mouvement sismique produit par le séisme du 27 février 2010 a été très fort en zone épiscopentrale où une accélération de 0,8 g a vraisemblablement été atteinte (communication de J. Campos responsable scientifique du service sismologique chilien). De fortes secousses ont été enregistrées à plus grandes distances (figure 4). Dans la ville de Santiago, à plus de 310 km de l'épicentre, les accélérations mesurées sont comprises entre 0,17 g et 0,56 g, ce qui témoigne de la forte variabilité des mouvements du sol. Par ailleurs, l'accélération de 0,56 g mesurée à la station de Maipu dépasse nettement celles enregistrées ailleurs dans Santiago (<0,3 g). Elle reste même supérieure à l'accélération de 0,47 g enregistrée à la station de Curicó, située bien plus près de l'épicentre (164 km au nord-est ; voir la figure 4). Cette observation singulière suggère que la géologie locale (présence de sédiments meubles ou géométrie de bassin complexe) pourrait être responsable d'effets d'amplification du mouvement sismique appelés « effets de site ». En 2006, l'IRSN, en collaboration avec l'Université du Chili, a réalisé des mesures des vibrations ambiantes pour cartographier la fréquence fondamentale de résonance du bassin de Santiago en relation avec la géologie du site (Bonnefoy-Claudet et al., 2008) et tenter de mettre en évidence les zones concernées par ces effets de site. Ces travaux ont reposé sur l'étude de la corrélation entre les dommages observés lors du séisme de Valparaiso en 1985 et la fréquence propre de vibration des sols. L'enregistrement du séisme principal de février 2010 et de ses répliques permettra de compléter cette étude et de mieux caractériser la réponse des sols sur une large bande de fréquences.

La comparaison des signaux sismiques enregistrés et des normes chiliennes en matière de conception parasismique (Nch 433 Of.96) montre que les sollicitations sismiques ont pu localement dépasser les valeurs d'accélération préconisées pour les bâtiments conventionnels (figure 4). C'est en particulier le cas pour le site de Maipu ou de Curicó.

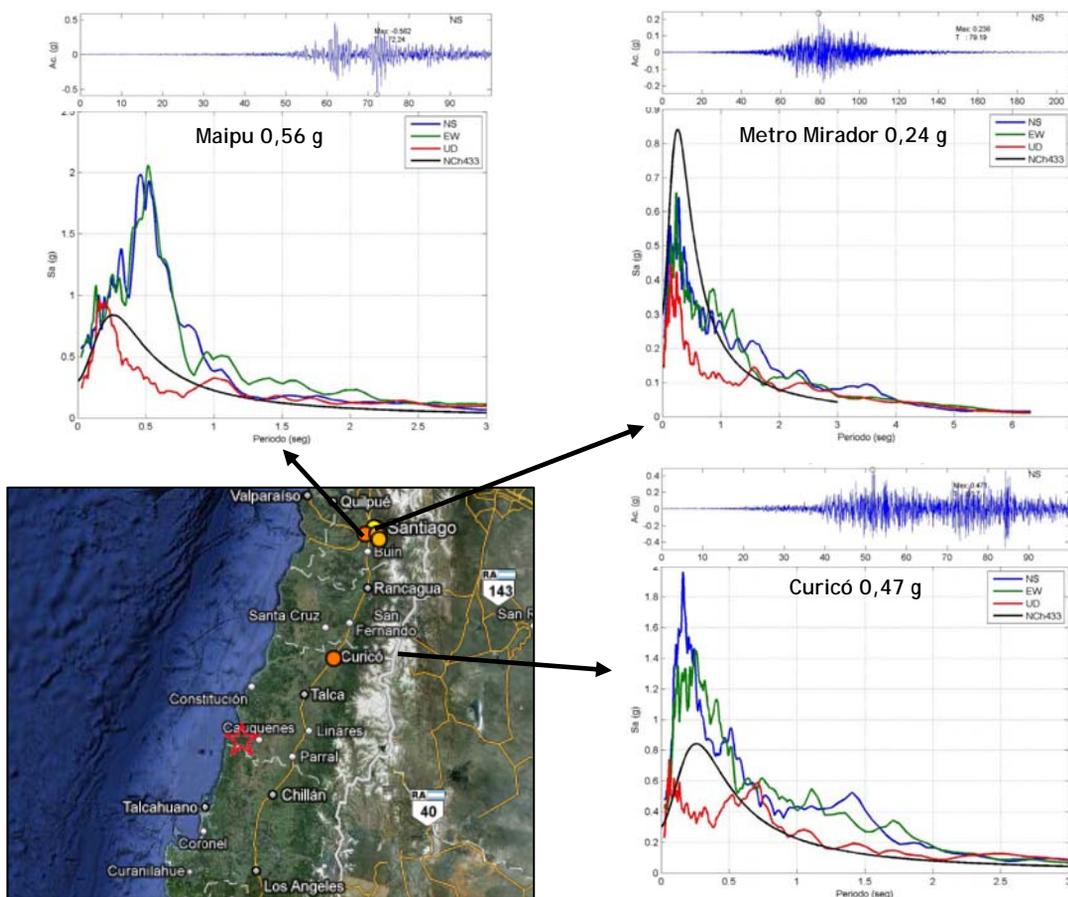


Figure 4 : Accélérations du sol mesurées par différentes stations sismologiques du réseau chilien. Le signal sismique enregistré est représenté en bleu. Les spectres de réponse élastique correspondants (accélérations maximales d'un oscillateur en fonction de sa période propre de vibration) sont comparés à ceux préconisés par la norme parasismique NCh433 en vigueur (courbes noires). Sources : département d'ingénierie civile de l'Université du Chili et www.strongmotioncenter.org.

Mission post-sismique au Chili

Après le séisme du 27 février 2010 survenu au Chili, Stéphane Baize, géologue à l'IRSN, s'est rendu sur place pour participer à une mission scientifique française organisée par le Laboratoire International Associé (LIA) «Montessus de Ballore ». Ce laboratoire, créé en 2006, regroupe des équipes de chercheurs français (CNRS-INSU/IPGP/ENS) et chiliens (Université du Chili).

Description

La mission qui s'est déroulée du 3 au 18 mars 2010 a regroupé une quinzaine de scientifiques français provenant de différents instituts (IPGP, ENS, LGIT, IRSN...) et une dizaine de leurs collègues chiliens (Université du Chili). D'autres scientifiques allemands et américains se sont joints ultérieurement à la mission en coordination avec le groupe franco-chilien. L'objectif de cette mission était de collecter des données qui permettront d'étudier finement le choc principal, ses répliques et les effets associés. La mission sera complétée au cours des prochains mois pour réaliser des observations géologiques, répéter les mesures géodésiques et collecter les données sismologiques enregistrées. Une mission post-sismique dédiée à l'analyse des dégâts aux constructions est également programmée en avril par l'Association Française du génie Parasismique (AFPS).

Instrumentation

Pendant la première phase de l'opération, l'équipe franco-chilienne a installé de nombreux instruments de mesure qui sont venus densifier les réseaux chiliens existants. La zone instrumentée couvre une zone d'environ 700 km de long sur 150 km de large. Une dizaine de GPS apportés de France vont servir à mesurer les déformations du sol occasionnées par le séisme. De plus, 15 accéléromètres et 26 sismomètres ont été déployés pour enregistrer plus finement les répliques (figure 5). Ce déploiement à grande échelle vise également à couvrir les régions adjacentes au nord (région de Valparaiso) et au sud (presqu'île d'Arauco) qui ont connu par le passé des séismes importants en 1985 et en 1960. Dans ces régions, il est possible que le séisme de 2010 déclenche de nouveaux événements de forte magnitude.

Les répliques

Au moment où la mission a débuté, une seule réplique importante était survenue, ce qui suscitait l'interrogation des scientifiques et des citoyens chiliens. Le 11 mars, la partie nord de la zone de rupture du choc principal a connu plusieurs fortes répliques de magnitudes comprises entre 6 et 6,9 (figure 1). D'après les premières analyses, ces répliques sont localisées en dehors de la zone de contact entre les deux plaques tectoniques Nazca et Amérique du Sud, à l'origine du choc principal du 27 février. Ces séismes sont d'origine plus superficielle et très probablement liés à des mouvements de rééquilibrage de la plaque sud-américaine. Une partie des instruments apportés dans le cadre de la mission a été installée dans cette région afin d'étudier la relation entre cette séquence et le choc principal.

Déformations de surface

Lors du choc principal, des appareils de positionnement par satellite (GPS) implantés en zone épiscopentrale ont mesuré le déplacement horizontal produit par le séisme (figure 6). La rupture sismique a été accompagnée, comme dans tout séisme de subduction comparable, d'un relâchement élastique de la plaque chevauchante continentale conduisant à un déplacement instantané vers l'Ouest de plusieurs mètres (observé par GPS) et d'un soulèvement de plusieurs dizaines de centimètres, pour les sites les plus proches de l'épicentre (observé sur le terrain).



Figure 5 : Installation lors de la mission LIA d'un sismomètre et d'un panneau solaire (gauche).
Accéléromètre implanté sur une dalle préfabriquée (haut)

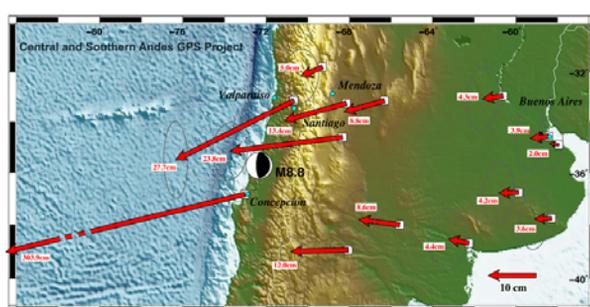


Figure 6 : Déplacement en surface de sites de référence positionnés par GPS, dû au séisme du 27 février 2010. Les flèches rouges indiquent que l'ensemble de cette région d'Amérique du Sud a subi une déformation vers l'Ouest avec un déplacement maximum de 3 mètres mesuré à Concepción (James Foster et Ben Brooks - University Hawaii).

Mission post-sismique au Chili

Observations géologiques de terrain

Une série d'observations a été effectuée sur le littoral de la zone épiscopale par les géologues de la mission (Université du Chili, IRD et IRSN) afin de quantifier les déformations verticales produites par le séisme et les hauteurs d'eau atteintes lors du tsunami (figures 7 et 8). L'ensemble du littoral entre Navidad au nord et Tirua au sud (~500 km de côtes) a été examiné. Des soulèvements importants ont été observés sur la bande côtière (1,70 m mesuré dans la presqu'île d'Arauco) alors que des subsidences (enfoncements) de l'ordre du mètre ont été mesurées dans les terres (au nord de Constitución).



Figure 7: La hauteur maximale de l'inondation provoquée par le tsunami du 27/2/2010 est soulignée par la présence des déchets déposés par l'eau (algues, sacs) qui se retrouvent ici à près de 12 mètres au-dessus du niveau marin du jour.



Figure 8: Le tsunami a déplacé des maisons en bois sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. En haut, à Tirua, même si la hauteur de la vague n'a pas été très importante (~5 mètres), l'inondation s'est avancée très loin dans l'estuaire. A Lipimavida (en bas), le déferlement de 8 m a déplacé plusieurs maisons à quelques dizaines de mètres au-dessus de la plage.



Figure 9: Le soulèvement de la côte à l'est de la ville de Lebu (100 km au sud de Concepción) est estimé à environ 1,70 mètres. Il a provoqué l'émersion des algues situées au premier plan sur la photo, entraînant leur mort et leur décoloration.

Impact sur les installations nucléaires

Au Chili, selon le communiqué de la Commission chilienne de l'énergie atomique (CCHEN : <http://www.cchen.cl>), les deux réacteurs des centres d'études nucléaires de La Reina et de Lo Aguirre, situés à proximité de la capitale, à environ 350 km de l'épicentre, étaient en activité lors du séisme. Les deux réacteurs ont été mis à l'arrêt automatiquement. Des vérifications préliminaires menées sur place ont confirmé leur arrêt effectif. Elles ont également permis d'établir qu'il n'y avait pas de dommages pouvant mettre en cause la sûreté nucléaire et d'exclure toute exposition radiologique anormale du personnel présent dans les installations et de la population en général. Seules quelques fenêtres et des canalisations d'eau potable ont été endommagées, sans conséquence pour la sûreté nucléaire.

En Argentine, la centrale nucléaire de production électrique la plus proche est située à Embalse à environ 900 km au nord-ouest de l'épicentre (figure 1). Il s'agit d'un réacteur de 600 MWe à eau lourde sous pression en activité depuis 1983. Il existe aussi un réacteur nucléaire de recherche à Bariloche, à 600 km au sud-est de l'épicentre. Compte tenu des distances importantes entre l'épicentre du séisme et ces installations, et de l'atténuation des ondes sismiques dans le sol, aucun effet notable n'est rapporté sur ces installations. Les seuls effets rapportés dans les villes environnantes sont des secousses de faibles intensités n'ayant pas occasionné de dégâts (intensités III et IV dans l'échelle Mercalli modifiée, source : USGS).

Au Japon, l'agence météorologique (JMA) avait lancé une alerte au tsunami avec une prédiction de hauteurs de vagues sur les côtes pouvant atteindre 3 mètres. Le 1^{er} mars 2010, une note d'information de la Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) destinée à l'Agence Internationale à l'Énergie Atomique (AIEA) rapporte que des tsunamis ont été observés sur sept sites de la côte est du Japon sur lesquels des centrales nucléaires sont construites. Une élévation du niveau marin de un mètre a été mesurée sur le site de Fukushima dai-ichi et une baisse de 1,2 mètres sur le site de la centrale de Tokai n°2. La note précise que cette série de vagues n'a pas eu de conséquence sur la sûreté de ces installations, compte tenu des protections mises en place pour protéger les installations contre les tsunamis et les surcotes marines.

Les enseignements

- Un séisme majeur de magnitude 8,8 s'est produit le 27 février 2010 dans la zone de subduction péri-andine, au centre du Chili. La zone épiscopentrale située juste au nord de la zone de rupture du séisme de 1960 (M 9,5) n'avait pas connu de séisme important depuis 1835, ce qui rendait probable la survenue d'un tremblement de terre majeur dans cette zone.
- Le bilan actualisé fait état de 452 morts et 96 disparus. Compte tenu de la taille importante de la faille mobilisée, des dégâts importants concernant l'habitat et les infrastructures ont été rapportés jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres, notamment dans la capitale Santiago du Chili située à 350 km au nord-est de l'épicentre.
- Le séisme a provoqué un tsunami qui s'est propagé dans l'océan Pacifique et a affecté les côtes chiliennes. Les hauteurs d'eau ont localement atteint 13 mètres et contribué à alourdir le bilan des dégâts humains et matériels du séisme. Ailleurs, il n'a pas été rapporté de victime ou de dégâts sévères.
- Deux réacteurs nucléaires de recherche implantés près de Santiago ont été mis automatiquement à l'arrêt. Des vérifications menées sur ces sites ont confirmé qu'il n'y avait pas de dommages pouvant mettre en cause la sûreté nucléaire. Le tsunami a été de faible amplitude au Japon et n'a pas affecté les centrales nucléaires implantées sur la côte orientale .