

# Regards sur...

## Les tremblements de terre d'Haïti (Mw 7 - janvier 2010) et du Chili (Mw 8,8 - février-mars 2010)

Début 2010, deux catastrophes sismiques ont successivement frappé le nord des Caraïbes (Port-au-Prince, Haïti, 12 janvier) et la côte ouest de l'Amérique du Sud au Chili central (séisme du Maule, 27 février). Bien qu'ayant tous deux marqué les esprits, ces événements diffèrent largement par leurs caractéristiques physiques et leurs effets, mettant ainsi en relief les paramètres variés qui gouvernent le risque sismique.

Le tremblement de terre d'Haïti a atteint la magnitude Mw 7, valeur relativement courante. En effet, 15 à 20 séismes de magnitude supérieure à 7 affectent la Terre chaque année, la plupart sans effets destructeurs. Néanmoins les conséquences de ce séisme furent catastrophiques avec un nombre de victimes particulièrement élevé (au moins 220 000) comparable à celui du séisme et tsunami de décembre 2004 à Sumatra. Mais ces deux événements s'opposent par leur magnitude (une énergie libérée 900 fois supérieure pour Sumatra), la surface de la zone affectée beaucoup plus concentrée en Haïti, et le type de faille responsable du tremblement de terre : décrochement superficiel en Haïti, rupture de type « megathrust » sur la zone de subduction à Sumatra. Le séisme du Maule au Chili central est lui très semblable à celui de Sumatra par son mécanisme de subduction et la genèse d'un tsunami destructeur et aussi par sa magnitude Mw 8,8 qui en fait le cinquième séisme enregistré depuis plus d'un siècle par ordre de magnitude. Malgré cette puissance exceptionnelle, le séisme chilien fit heureusement un nombre de victimes – un demi-millier – beaucoup moins élevé qu'en Haïti. Pourquoi de telles différences de destructions et de létalité ? Ces séismes étaient-ils attendus, prévisibles ? Peut-on mieux anticiper de telles catastrophes et leurs effets ? Les premières données et modèles sur ces deux tremblements de terre permettent de décrire au premier ordre la source sismique et le

contexte sismotectonique, et aussi d'apporter un début de réponse à ces questions primordiales.

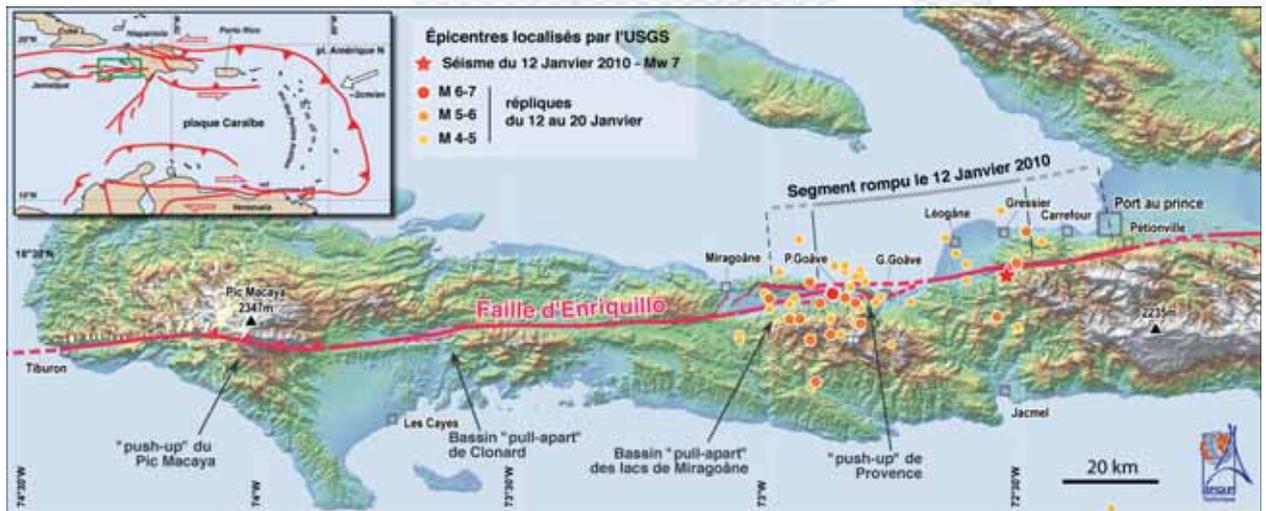
### La catastrophe de Port-au-Prince

Le tremblement de terre du 12 janvier s'est produit dans le sud d'Haïti à proximité immédiate de la capitale Port-au-Prince, sur la frontière des plaques tectoniques Caraïbe et Amérique du Nord. À travers l'île d'Hispaniola, plusieurs failles absorbent le déplacement relatif oblique, de 2 cm/an, entre ces plaques : chevauchements sous-marins bordant les côtes nord et sud de l'île, failles décrochantes de direction est-ouest. Les décrochements principaux sont la faille Septentrionale au nord de l'île et la faille d'Enriquillo à travers le sud-ouest d'Haïti. D'après les mesures GPS et leur modélisation, chacune de ces failles décrochantes aurait une vitesse moyenne d'environ 7 à 8 mm/an. Les données de sismicité historique montrent que la faille d'Enriquillo n'avait pas rompu depuis la séquence de 3 événements destructeurs qui a affecté le sud d'Hispaniola au 18<sup>e</sup> siècle (1751a, 1751b, 1770). En janvier 2010, c'est un segment de cette faille d'Enriquillo qui a rompu à nouveau : les données de sismicité et de déformation, encore préliminaires, suggèrent une rupture sismique longue d'environ 50 km avec un mécanisme complexe décrochant-chevauchant. Mal exprimée en surface, la rupture se serait produite entre 2 et 15 km de profondeur et le segment au sud et sud-est de Port-au-Prince n'aurait pas rompu. On a donc l'image paradoxale d'un séisme de magnitude relativement commune, ayant cassé une portion limitée d'une grande faille décrochante (50 km par rapport aux 300 km de longueur à terre de la faille d'Enriquillo), mais faisant deux à trois fois plus de victimes que le plus catastrophique des séismes connus de magnitude ~7. Les premières raisons à cela sont un foyer

du séisme peu profond, très proche des grandes agglomérations et des mécanismes appelés "effets de site" qui ont pu amplifier localement les ondes ou leurs conséquences directes (liquéfaction des sols en particulier). Ce contexte rappelle le séisme de Kôbe de magnitude 6,8 en 1995, qui fit 6 400 victimes dans un des pays les plus riches et a priori les mieux préparés de la planète. Mais c'est probablement l'état économique et l'histoire chaotique d'Haïti qui sont les principaux responsables de l'ampleur du désastre. Les premières expertises sur le bâti montrent que l'essentiel des constructions était totalement inadapté pour résister aux secousses sismiques. En cela, la catastrophe de Port-au-Prince révèle la menace que l'on sait planer sur plusieurs mégapoles mondiales construites à proximité immédiate de grandes failles, souvent sans respect des normes parasismiques. Comme pour beaucoup de ces villes, le risque menaçant Port-au-Prince était identifié et les géologues haïtiens avaient exprimé leur forte préoccupation. Il faut maintenant espérer que la reconstruction se fera en tenant compte de l'aléa sismique et des effets de site locaux et en respectant un code de construction parasismique adapté au contexte haïtien.

Les séismes sur les grandes failles décrochantes sont connus pour se produire souvent en séquences, la rupture d'un segment déclenchant en cascade celle des segments adjacents. L'exemple le plus démonstratif est celui de la faille nord Anatolienne en Turquie avec plus de 10 séismes, de magnitude 6,8 à 7,9, se propageant d'est en ouest entre 1939 et 1999 jusqu'au voisinage d'Istanbul. C'est peut-être ce qui s'est déjà passé au 18<sup>e</sup> siècle dans le sud d'Haïti (1751a, 1751b, 1770). A condition de bien connaître la géométrie et le mécanisme d'un séisme, les vitesses tectoniques et si possible l'histoire sismique de la région (peu précise pour Haïti), on peut calculer les changements de contraintes induits par une

# Regards sur...



Cadre tectonique, géométrie de la Faille d'Enriquillo à travers le sud-ouest d'Haïti, et segment rompu le 7 janvier 2010 lors du séisme de magnitude.

rupture sur les failles adjacentes. Ce type de calcul suite au séisme du 12 janvier montre une charge accrue sur les segments de faille situés de part et d'autre de celui qui a rompu. Il faut donc envisager l'hypothèse d'une rupture future des segments à l'est de la source de ce séisme (immédiatement au sud-est de Port-au-Prince) et à l'ouest (vers la péninsule de Tiburon) au cours des prochaines décennies, avec des événements de magnitudes au moins équivalentes à celle du 12 janvier. Par contre, nous ne disposons pas de modèle physique fiable pour prédire avec précision le délai d'occurrence de tels événements sismiques déclenchés.

## Le séisme du Maule au Chili central

Un peu plus d'un mois après Haïti, le 27 février 2010, un puissant tremblement de terre de magnitude Mw 8,8 a frappé le centre du Chili avec un épicentre proche des villes de Chillan, Concepción, Constitución, Talca. Santiago, capitale du Chili, à environ 300 km de l'épicentre, a aussi été sévèrement affectée par le séisme. La localisation de l'épicentre au niveau de la côte, sa profondeur (hypocentre entre 25 et 40 km) et son mécanisme chevauchant indiquent que la rupture s'est produite sur le plan de subduction entre les plaques Nazca et Amérique du Sud. La faille rompue est un chevauchement plongeant faiblement (15 à 20°) vers l'est sous la marge continentale chilienne. De très nombreuses et fortes répliques ont été enregistrées

dans les jours qui ont suivi le choc principal (environ 90 répliques de magnitude supérieure à 5 dans les 24 h, les plus fortes atteignant la magnitude 6,9). La zone principale de répliques s'étend vers le nord jusqu'à Valparaiso et dépasse vers le sud la péninsule d'Arauco avec une extension nord-sud de 600 km qui correspond à la taille maximum du segment de faille rompu lors du choc de magnitude 8,8. Les premiers modèles sismologiques et géodésiques montrent que le glissement cosismique sur le plan de rupture, hétérogène, a pu dépasser la dizaine de mètres. C'est donc un segment de la zone de subduction d'environ 500 km de long et large de plus de 100 km qui a rompu entre 50 km de profondeur et son émergence en surface au niveau de la fosse océanique. Il s'agit d'un séisme de subduction typique, de type "megathrust", très comparable à celui du 26 décembre 2004 à Sumatra.

Comme celui de Sumatra, le séisme du 27 février a généré un tsunami destructeur sur les côtes proches de l'épicentre. Toutes les îles de l'océan Pacifique et son pourtour ont été mises en alerte pendant 24 h, temps nécessaire pour que l'onde de tsunami atteigne le Japon. Les hauteurs de vagues enregistrées loin des côtes chiliennes sont assez faibles (moins d'un mètre) impliquant une ampleur relative limitée à la source et une rapide atténuation avec la distance. En champ proche, les observations recueillies sur la côte chilienne suggèrent des hauteurs de «run-up» de 3 à 5 m, avec des amplifications locales pouvant atteindre

8 m environ. Parmi les localités les plus touchées par le tsunami : Constitución, à l'embouchure du fleuve Maule, Talcahuano, à proximité de Concepción, Dichato, Iloca, Dúo, Pelluhue, et les îles Juan Fernandez (voir 4<sup>e</sup> de couverture).

A cause de la convergence rapide Nazca-Amérique du Sud (près de 7 cm/an), la zone de subduction du Chili a une forte activité sismique avec, en moyenne, un séisme de magnitude 8 tous les dix ans. Le plus grand séisme jamais enregistré (depuis que nous disposons de sismographes) de magnitude environ 9,5, s'est produit au Chili en 1960, juste au sud de la zone qui vient de rompre en février 2010. Deux lacunes sismiques (ou "gap") sont identifiées et étudiées depuis au moins une vingtaine d'années au nord et au centre/sud du Chili et semblaient mûres pour une rupture prochaine. La lacune d'Arica au nord, siège du séisme et tsunami de 1877 et la lacune de Concepción, siège du séisme de 1835 vécu et décrit par Darwin et Fitz-Roy. Cette lacune était bordée au sud par la rupture géante de 1960 et au nord par les séismes de Valparaiso en 1906 et 1985. Dans cette région, les mesures GPS effectuées par les équipes de l'IPGP et de l'ENS en collaboration avec l'université du Chili, montraient une accumulation « normale » de la déformation, sans aucun glissement asismique. En 175 ans et à 7 cm/an, au moins 12 m de déformation avaient été accumulés sur ce segment de 400 km de long. En conséquence, dans un article récent, Ruegg *et al.*

# Regards sur...

concluait à la forte probabilité d'une rupture imminente de la lacune de Concepción avec une magnitude entre 8 et 8,5. L'épicentre du séisme du 27 février est localisé en plein milieu de cette lacune. La rupture s'est propagée à la fois vers le sud et vers le nord, de manière à rompre la totalité du segment de 1835, et même au delà vers le nord, puisqu'elle semble avoir repris, au moins en partie, les segments qui avait rompu en 1906, 1928 et 1985.

Le séisme du Maule a engendré de très importants dégâts matériels, un fort endommagement des infrastructures (ponts et autoroutes en particulier), et un important traumatisme social. Mais, heureusement, les pertes humaines ont été relativement limitées. La plupart des destructions du bâti ont touché l'habitat traditionnel, le plus souvent en argile crue (adobe), et des immeubles anciens de faible hauteur qui ont pu être abandonnés rapidement par leurs occupants. La structure des immeubles modernes, bien que parfois endommagée, a généralement bien résisté, maintenant ainsi l'intégrité des bâtiments récents construits dans le respect des normes parasismiques. L'impact humain du tsunami, très destructeur sur la côte, a lui aussi été limité par la « culture sismique » très présente dans la société chilienne. Les habitants des vil-

lages côtiers, avertis par l'arrivée des ondes sismiques, ont pour beaucoup eu le temps de rejoindre les hauteurs avant les premières vagues. Cette évacuation spontanée est d'autant plus remarquable que le système d'alerte officiel n'a pas été activé à temps en raison d'une mauvaise identification initiale du potentiel tsunamigénique du séisme.

## Quels enseignements en tirer sur le risque sismique ?

Le cas du séisme chilien montre que l'impact humain d'un très gros tremblement de terre et d'un tsunami associé peut être relativement limité si l'aléa sismique est identifié et compris par l'ensemble de la société. Les vitesses tectoniques rapides et la forte activité sismique, font qu'une grande partie de la population chilienne a une expérience vécue des séismes lui permettant de réagir de façon appropriée. Dans le cas plus général où l'activité sismique est insuffisante pour conserver vivant le souvenir des séismes ou tsunamis passés, il s'agit à la fois d'un défi scientifique, pour identifier les sources sismiques potentielles et passer le message vers la sphère politique et d'un défi éducatif auprès du grand public pour

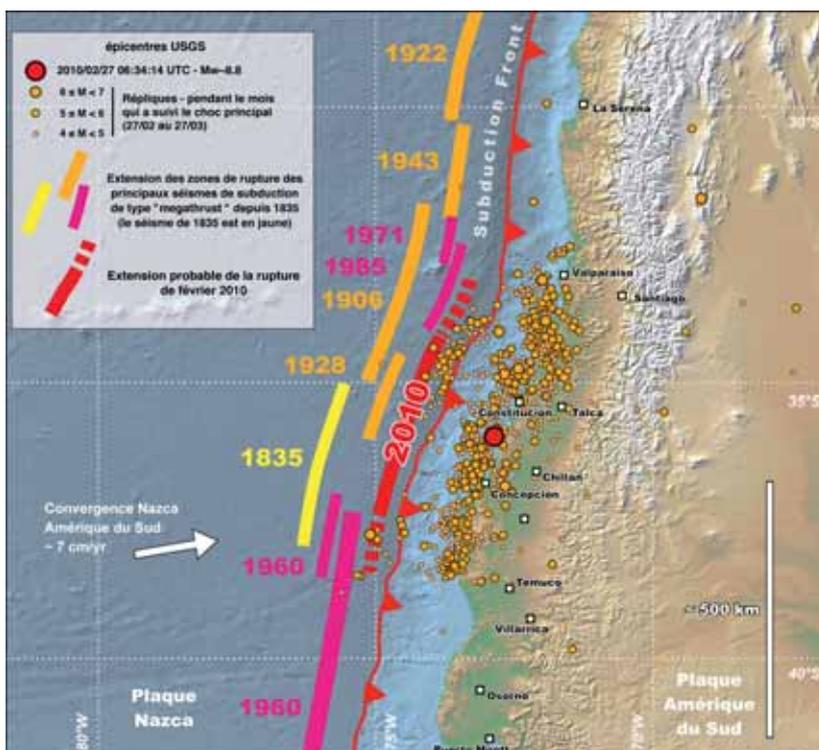
expliquer les mécanismes physiques et les actions à suivre.

La reconstruction de Port-au-Prince, urgente, pose, elle, un défi technique, humain et financier. Le fait que la faille d'Enriquillo n'ait rompu que sur une faible partie laisse entier un risque sismique local à court-moyen terme. Il faudra donc reconstruire parasismique, mais peut-être en inventant des techniques simples et légères adaptées au contexte économique et social du pays. Rappelons qu'après les trois séismes du 18<sup>e</sup> siècle, le représentant du roi de France avait interdit la reconstruction de Port-au-Prince en maçonnerie !

Enfin, le type de source sismique a bien sûr un effet majeur sur les conséquences et la létalité. Le séisme haïtien, comme celui de Kôbe en 1995, montre une fois de plus que les ruptures sismiques les plus dangereuses sont souvent celles produites par des failles d'ampleur limitées mais très proches des villes. Même dans un contexte de subduction, propre à générer des ruptures chevauchantes de très forte magnitude, il est donc crucial d'identifier et d'étudier également les failles crustales superficielles. En effet, ces failles sont souvent mal connues car beaucoup plus lentes et moins sismiques que la subduction elle-même. Cela passe donc par des études géologiques et paléosismologiques détaillées.

Les séismes d'Haïti et du Chili ont donné lieu à d'importantes interventions de la communauté géophysique internationale, avec une forte implication des équipes françaises. Pour ne citer que deux exemples : déploiement de sismomètres fond de mer en Haïti par l'Atalante (Ifremer, mission coordonnée par Géosciences Azur, université de Nice), intervention sismologique, géodésique et géologique encore en cours au Chili (dans le cadre du LIA Montessus de Ballore CNRS-INSU, ENS-IPGP - université du Chili). Sans aucun doute, de nombreuses données et modèles de premier ordre viendront sous peu préciser les informations très préliminaires discutées ici.

R. LACASSIN  
Équipe de Tectonique  
Institut de Physique du Globe de Paris  
et Université Paris Diderot  
(Sorbonne Paris-Cité),  
UMR CNRS 7154.  
lacassin@ipgp.fr



Cadre sismotectonique du séisme du Maule de février 2010 au Chili central.