

5 > Un séisme de magnitude 9 est-il possible le long de l'arc himalayen ?

La chaîne himalayenne, située sur la bordure sud du plateau tibétain, est sans doute la manifestation la plus spectaculaire de la collision entre l'Inde et l'Eurasie. La vitesse de convergence actuelle, d'environ 40 mm/an entre ces deux plaques, est accommodée pour moitié au travers de l'Himalaya, le long d'une grande faille chevauchante communément appelée le MHT (pour *Main Himalayan Thrust*).

De nombreuses études (Molnar et Qidong, 1984 ; Le Roux-Mallouf *et al.*, 2016) ont démontré le caractère sismogène de ce chevauchement (fig. 5-1). Au cours du dernier siècle, l'arc himalayen a ainsi été affecté par plusieurs séismes destruc-

teurs, de très forte magnitude, comme celui de Kangra en 1905, de Bihar-Népal en 1934, d'Assam en 1950 et plus récemment, celui de Gorkha en 2015 (voir encadré). La magnitude maximale que pourrait avoir un séisme le long de l'arc himalayen reste cependant une question ouverte donnant lieu à de nombreux débats scientifiques (Kumar *et al.*, 2010 ; Wesnousky *et al.*, 2017). C'est pourtant un paramètre clé pour estimer l'impact maximal qu'un séisme pourrait avoir sur des pays comme le Pakistan, le Népal, le Bhoutan mais aussi sur tout le nord de l'Inde, qui est l'une des zones les plus peuplées du monde (densité de population supérieure à 500 habitants au km²). ●●●

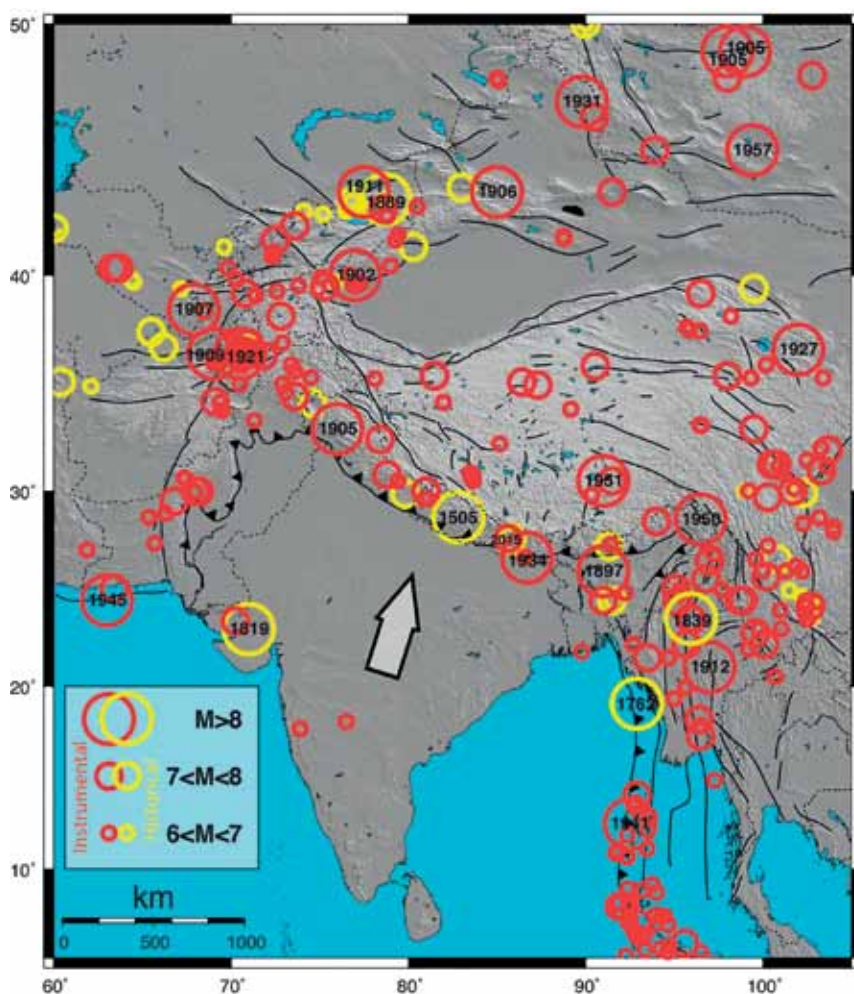


Fig. 5-1. – Localisation des séismes majeurs associés à la collision Inde-Eurasie. Les cercles rouges et jaunes indiquent respectivement la sismicité instrumentale et historique, leur taille étant associée à la magnitude estimée.

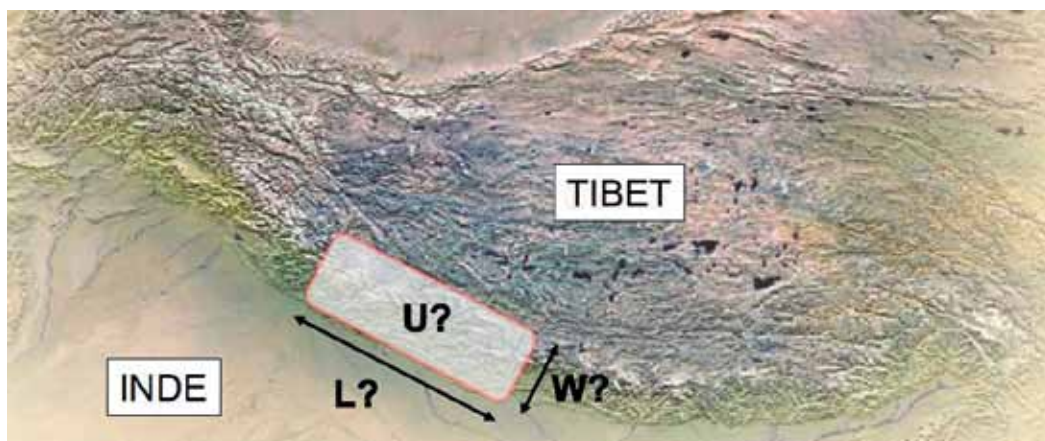


Fig. 5-2. – Carte topographique de la région Himalaya-Tibet, montrant les paramètres d'une rupture sismique permettant de caractériser sa magnitude.
W : largeur de la zone sismogène, L : extension latérale et U : glissement sismique moyen.

●●● Par définition, une magnitude sismique est associée à l'énergie libérée au cours d'une rupture. Elle dépend de la taille de cette rupture (largeur W et longueur L) ainsi que de la répartition du déplacement moyen U accommodé par la faille pendant le séisme (fig. 5-2). Tenter de répondre à la question « Un séisme de magnitude 9 est-il possible le long de l'arc himalayen ? » nécessite donc de connaître au mieux ces trois paramètres en s'appuyant sur les informations disponibles permettant de contraindre la géométrie en profondeur du MHT, de caractériser la segmentation de l'arc himalayen et de quantifier le glissement sismique des séismes passés qu'ils soient instrumentaux ou historiques.

Largeur de la zone sismogène

L'estimation de l'extension en profondeur de la zone sismogène du MHT reste délicate. En effet, à notre connaissance, aucune information précise associée aux séismes instrumentaux majeurs ayant rompu l'ensemble de cette zone n'existe. Seules des approches indirectes peuvent donc être utilisées. La première consiste à étudier la déformation intersismique (période d'environ 200-300 ans séparant les séismes majeurs) *via* les observations géodésiques et l'analyse de la sismicité (Stevens, 2015). Elle montre notamment que le MHT est bloqué dans sa partie supérieure et que la zone sismogène a donc une extension pouvant aller de la haute chaîne jusqu'à la bordure de l'arc himalayen (fig. 5-3a). Une seconde approche, à plus long terme (de plusieurs dizaines de milliers au million d'années) consiste à estimer la géométrie de cette zone bloquée en utilisant des observations géomorphologiques (Le Roux-Mallouf *et al.*, 2015) et tectoniques (fig. 5-3b). En combinant ces deux approches on estime que l'ordre de grandeur de W peut atteindre une centaine de kilomètres (fig. 5-3c).

Variation latérale de la géométrie

L'arc himalayen s'étend sur plus de 2 500 km de long. Pendant longtemps, cette chaîne a été considérée comme un exemple d'objet géologique ayant une géométrie quasi cylindrique, c'est-à-dire sans variation majeure de ces structures d'est en ouest. Cependant de nombreuses études récentes ont démontré le caractère segmenté de l'arc himalayen aussi bien du point de vue de sa morphologie (Duncan *et al.*, 2003) que de l'organisation des structures tectoniques majeures (McQuarrie *et al.*, 2008), de la géométrie du MHT en profondeur (Robert *et al.*, 2011) et du Moho (Bollinger *et al.*, 2014). La difficulté est donc d'estimer si cette segmentation peut contrôler la taille de futurs événements sismiques. Les observations suggèrent un blocage intersismique du MHT sur la quasi totalité de l'arc himalayen (Stevens *et al.*, 2015). De plus les segments mis en évidence ont une extension latérale pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres de long. Il apparaît donc que, bien que segmenté, l'arc himalayen pourrait être affecté par des ruptures dont les longueurs L sont comparables à celles observées pour les plus grands séismes de subduction.

Estimation du glissement sismique moyen

Le dernier paramètre à considérer est le glissement sismique U sur le MHT. Les séismes instrumentaux majeurs (séismes mesurés depuis le déploiement des premiers sismomètres au début du 20^e siècle) sont associés à des glissements moyens de quelques mètres, qui peuvent atteindre environ 20 m comme dans le cas du séisme d'Assam, de magnitude 8,7 en 1950 (Molnar et Qidong, 1984). L'échelle de temps associée aux séismes instrumentaux (environ 120 ans) est cependant trop courte pour être considé-

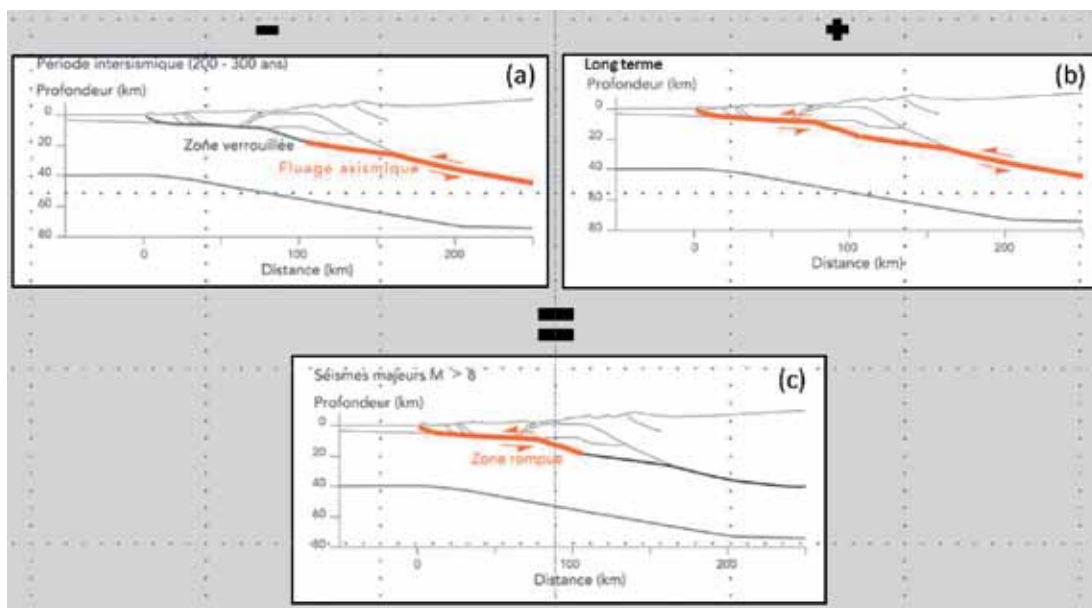


Fig. 5-3. – Estimation de l'extension en profondeur de la géométrie de la zone sismogène du MHT. (a) La géométrie de la zone asismique du MHT est estimée à partir d'observations géodésiques et sismiques. (b) La géométrie de l'ensemble du MHT est caractérisée à partir d'observations sur le long terme comme la géologie structurale ou la géomorphologie. (c) La caractérisation de la partie sismogène du MHT est donc obtenue en faisant la différence (b) – (c).

●●● rée comme représentative des tremblements de terre himalayens, la période d'occurrence des séismes majeurs pouvant être de plusieurs siècles. L'approche conjointe basée sur l'analyse de documents relatant des séismes historiques et sur des études paléosismologiques a permis d'étendre notre connaissance aux séismes du dernier millénaire (Sapkota *et al.*, 2013 ; Le Roux-Mallouf *et al.*, 2016 ; Kumar *et al.*, 2010 ; Bollinger *et al.*, 2014). Ces études démontrent notamment l'occurrence de méga-tremblements de terre le long de l'arc himalayen avec des glissements décamétriques. Ces observations restent cependant locales et l'erreur inhérente aux méthodes de datation empêche d'établir avec certitude une corrélation entre ces événements extrêmes.

Conclusion

Les études menées le long de l'arc himalayen depuis plusieurs décennies ont montré que cette bordure du plateau tibétain est l'une des zones les plus sismiquement actives à la surface de la terre. Des séismes destructeurs, comme celui de Gorkha, sont maintenant bien documentés.

Le séisme d'Assam de 1950 avec une magnitude de 8,7 correspond au plus gros tremblement de terre enregistré en Himalaya depuis un siècle. Dans la même période de temps, tous les séismes de magnitude supérieure à 9 ont eu lieu dans des zones de subduction : Chili 1960, Sumatra 2004, Alaska 1964, Kamtchatka 1952 et Japon 2011. L'occurrence de ces séismes en domaine océanique peut être associée aux caractéristiques des zones de subduction qui accommodent des vitesses de convergence importante et présentent une extension spatiale colossale.

L'étude présentée ici suggère que l'Himalaya possède également ces caractéristiques (une largeur de rupture possible $W \sim 100$ km, une longueur $L \sim 500-1\ 000$ km, un déplacement $U > 20$ m) et donc que physiquement l'occurrence d'un méga-séisme, de magnitude 9 ou plus, affectant cette zone ne peut être exclue.

■ **R. Cattin¹, L. Bollinger², Y. Klinger³**

¹ Géoscience, Univ. de Montpellier

² CEA, DAM Île-de-France, Bruyères-le-Châtel

³ CNRS-IPG-Paris

La bibliographie des articles peut être consultée sur le site de la SGF à l'adresse suivante : <http://www.geosoc.fr/publication/geochronique/numero-actuel.html>

Focus sur le séisme de Gorkha

Le 25 avril 2015 à 11h56, un fort séisme dévastateur, de magnitude 7,8 affecte le front himalayen et la vie de millions de népalais. Près de 20 % des habitants du Népal vivent à proximité de la zone mésoséismale, la région affectée par les destructions. Heureusement, le séisme a lieu un samedi matin, jour de repos hebdomadaire à une heure où peu d'habitants sont dans les bâtiments, qui au Népal sont particulièrement vulnérables aux séismes (fig. 5-4). Après le séisme on recensera toutefois plus de 8 700 morts, des dizaines de milliers de blessés, et plusieurs millions de sans-abris sur une bande de près de 120 km de long au pied de la haute chaîne.

Ce type d'événement sismique était à la fois attendu et redouté. Le séisme de Bihar-Népal de 1934, 4 à 8 fois plus important, est encore dans toutes les mémoires. D'autres forts séismes historiques dévastateurs sont connus et principalement documentés en vallée de Kathmandou. Au total, un peu plus d'une dizaine de séismes historiques

de magnitude 7 à 8,5 et cinq grands séismes instrumentaux sont connus. Ces plus forts séismes ont été ressentis à très grande distance par des millions d'habitants. C'est le cas du séisme de Gorkha ressenti sur près de la moitié du sous-continent indien.

Le séisme de Gorkha est, avec le séisme pakistanais du Muzaffarabad de 2005, un des premiers grands séismes himalayens instrumentaux de l'ère moderne. Le grand nombre d'études géologiques, géophysiques ou géochimiques effectuées au Népal, préalablement et à la suite de cet événement, font de ce séisme intercontinental en chevauchement l'un des mieux étudiés. Lors du séisme, une large bande de terrain d'environ 1 600 km² (80 x 20 km), a été soulevée de près d'un mètre au front de la chaîne alors que la haute chaîne s'affaissait d'environ un mètre (fig. 5-5). La ville de Kathmandou quant à elle s'est déplacée de 1,5 à 2 m vers le sud. Cette déformation de la surface résulte de la rupture sismique sur un plan de faille de près de 120 x 50 km qui présente localement un glis-



Fig. 5-4. – En haut - Photographies du village de Barpak localisé dans la zone épiscopale du séisme de Gorkha. En bas - Durbar square de Kathmandou (temple de Bashantapur) avant et après le tremblement de terre de 2015.

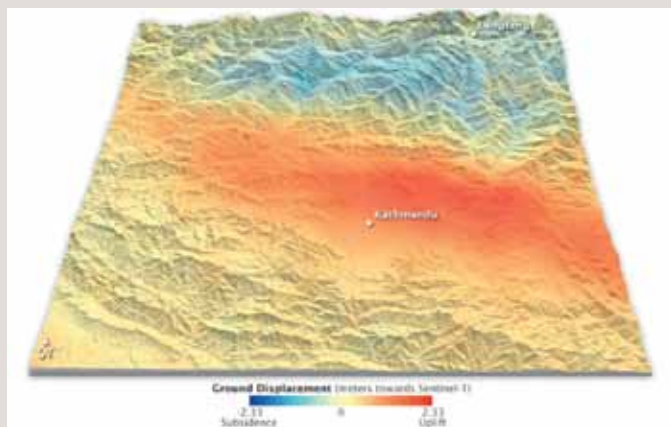


Fig. 5-5. – Déplacements observés par le satellite Sentinel-1 dans la région de Kathmandou suite au séisme de Gorkha de 2015. Le code de couleur indique les variations de la distance terre-satellite et vient draper la carte de la topographie figurée par les ombrages.

●●● sement de plus de 5 mètres. La rupture, sans doute contrôlée par la structure profonde du chevauchement, s'est arrêtée à proximité de l'extension du fort séisme de 1934 et ne s'est pas propagée jusqu'en surface. Le choc principal a été suivi par des dizaines de milliers de répliques localisées en grande partie en périphérie de la rupture (fig. 5-6). En novembre 2016, 18 mois après le séisme, près de 30 000 répliques avaient été localisées par le réseau sismique national du Népal, dont 472 de

magnitude locale supérieure à 4, qui ont déclenché une alerte sismique. La déformation postsismique actuellement mesurée est essentiellement profonde et à 75 % asismique.

■ **R. Cattin¹, L. Bollinger², Y. Klinger³**

¹ Géoscience, Univ. de Montpellier

² CEA, DAM Île-de-France, Bruyères-le-Châtel

³ CNRS-IPG-Paris

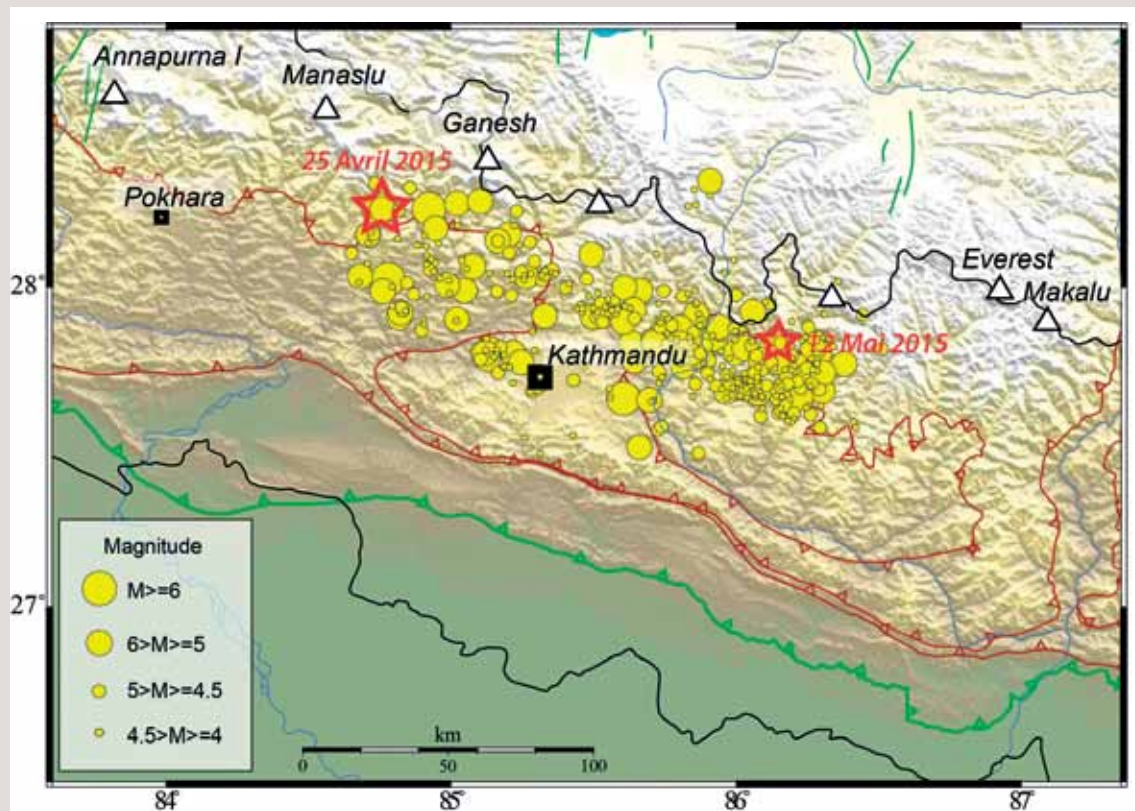


Fig. 5-6. – Carte des épacentres des séismes de magnitude supérieure à 4, du 25 avril au 08 juin 2015. Les étoiles rouges correspondent aux épacentres des chocs principaux du 25 avril et du 12 mai 2015.