

L'importance des tremblements de terre déclenchés par l'activité humaine dans la sismicité des régions continentales stables

Thierry CAMELBEECK

Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles, Belgique - cam@oma.be

Résumé

Des études récentes suggèrent que la sismicité dans les régions continentales stables (RCS) et les grands tremblements de terre qui y sont associés peuvent être expliqués par l'action de perturbations transitoires des contraintes locales dans la croûte terrestre ou de la résistance des failles au glissement. Dans cet article, nous expliquons pourquoi ces contraintes transitoires joueraient un rôle beaucoup plus fondamental dans l'initiation des grands tremblements de terre en RCS qu'en limite de plaques. Ces modifications de contraintes dans la croûte peuvent être reliées à des phénomènes environnementaux naturels, mais aussi à certains types d'activité humaine. Nous discutons la contribution induite par l'Homme à la sismicité en RCS et défendons l'idée qu'elle est probablement beaucoup plus répandue qu'il n'est généralement admis. Cette hypothèse pose la question de la validité des méthodes d'évaluation de l'aléa sismique en RCS et montre l'importance de mieux comprendre la contribution des séismes induits par l'activité humaine dans la sismicité observée.

Mots-clés : tremblements de terre, régions intracontinentales, magnitude, risques sismiques

Abstract

Recent studies suggest that seismicity in stable continental regions (SCRs) and associated large earthquakes can be explained by the action of transient perturbations of local crustal stresses or fault slip resistance. In this paper, we explain why these transient stresses would play a much more fundamental role in the initiation of large earthquakes in SCRs than in plate boundaries. These stress changes in the crust can be related to natural environmental phenomena, but also to certain types of human activity. We discuss the human-induced contribution to SCR seismicity and argue that it is probably much more widespread than is generally accepted. This hypothesis raises the question of the validity of seismic hazard assessment methods in SCR and shows the importance of better understanding the contribution of human-induced earthquakes to the observed seismicity.

Keywords : earthquakes, intracontinental regions, magnitude, seismic risks

Publié à l'occasion du Colloque annuel 2021 de la Société Royale des Sciences de Liège, le 26 novembre 2021.

1. L'activité sismique dans les régions continentales stables

Une grande partie de l'activité sismique mondiale se produit à la limite des plaques lithosphériques couvrant notre planète. Cependant, une sismicité résiduelle existe dans des

régions qui ne sont pas affectées par les processus géodynamiques actifs en limites de plaques. Ces régions dans lesquelles les processus tectoniques sont très faibles et qui couvrent une grande partie des continents sont appelées « régions continentales stables » (RCS) (Johnston, 1989 – Figure 1). Cependant, des grands tremblements de terre dont la magnitude de moment M_w (Hanks and Kanamori, 1979) peut dépasser 6,0, même s'ils sont rares, se produisent dans ces régions considérées comme stables. Certains de ces événements peuvent être très destructeurs et la cause de nombreuses victimes lorsqu'ils se produisent dans des régions à haute densité de population (Bilham, 2009 ; Seeber et al., 1996, Camelbeeck et al., 2017).

Cette activité sismique et les rares grands tremblements de terre associés apparaissent épisodiques, concentrés temporairement sur certaines zones de failles durant des périodes variant de quelques dizaines, centaines et milliers d'années et ensuite migrent vers d'autres structures similaires dans d'autres régions qui souvent étaient auparavant reconnues comme inactives (Crone et al., 1997, Stein and Mazzoti, 2007). C'est la raison pour laquelle Liu et Stein (2016) décrivent les grands séismes en RCS comme « inattendus » par comparaison à la majorité des grands tremblements de terre en limites de plaques qui sont « attendus » parce que leur localisation et récurrence moyenne est prédite par le mouvement stationnaire des plaques lithosphériques (Kanamori and Brodsky, 2004) et dans certaines de ces régions par la connaissance de l'emprunte des grands tremblements de terre dans les couches géologiques.

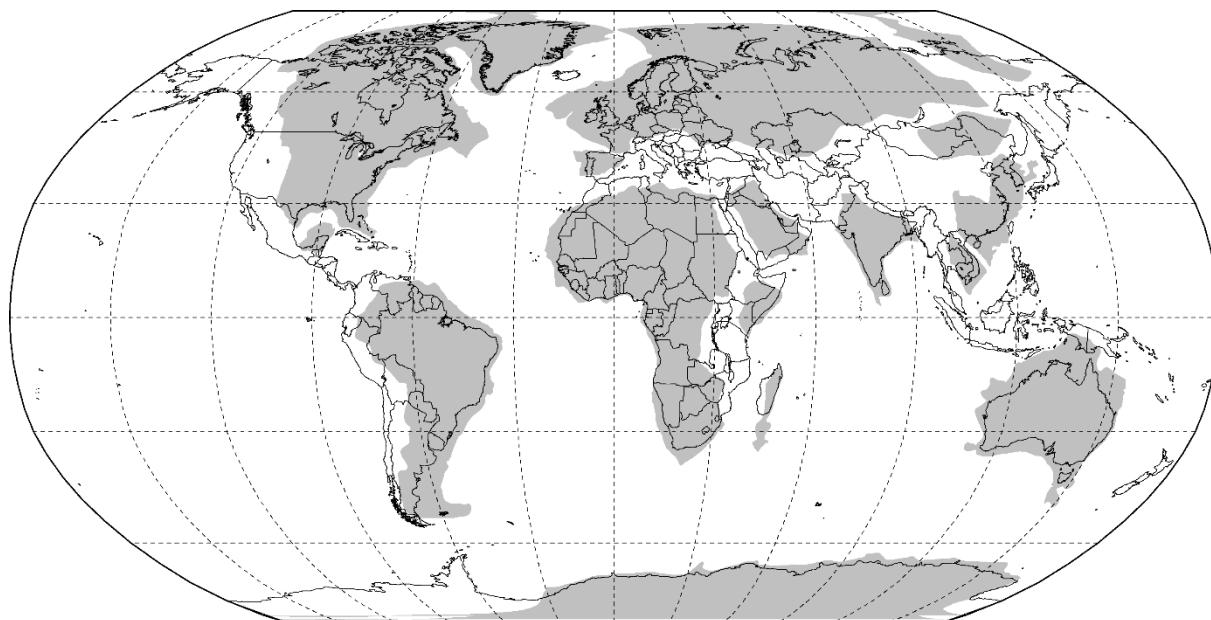


Figure 1: Régions continentales stables. Les régions continentales stables (RCS) définies par Johnston (1989) sont représentées en gris sur la carte. Mise à jour basée sur EPRI et al. (2012).

2. Le modèle classique de la genèse des tremblements de terre

Le modèle classique du déclenchement des tremblements de terre est basé sur les observations faites aux frontières des plaques. Là, les mouvements relatifs constants des plaques créent une augmentation progressive dans le temps de la contrainte de cisaillement τ agissant sur les zones de failles délimitant les plaques lithosphériques. Ces failles ne bougent pas tant que τ reste inférieur à $\mu_s(\sigma_n - P_f)$ dans leur partie la plus fragile (Figure 2) [σ_n est la contrainte normale à la faille, μ_s est le coefficient de friction statique de la roche et P_f est la pression des fluides dans la masse rocheuse]. Lorsqu'une faille est réactivée lors d'un grand séisme, elle libère une partie de l'énergie de déformation accumulée par le mouvement relatif des plaques le long de la portion de faille sur laquelle s'est produit le grand séisme précédent. Par conséquent, après l'occurrence de l'événement et en raison de la continuité du mouvement de la plaque, un nouveau cycle sismique commence et une nouvelle énergie de déformation élastique est progressivement reconstruite sur toute la longueur de la limite de la plaque rompue jusqu'au grand événement suivant.

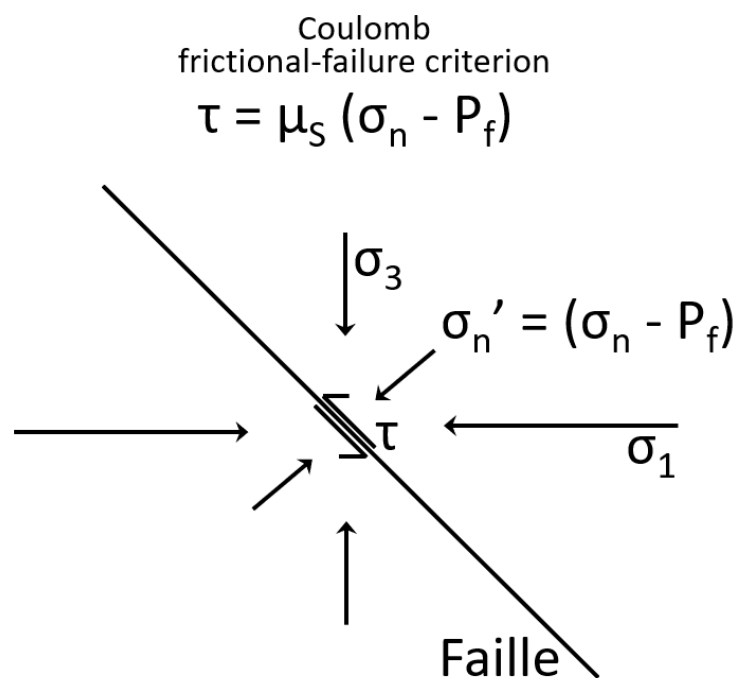


Figure 2. Contraintes sur une faille plane - critère de glissement. σ_1 et σ_3 sont respectivement les contraintes principales maximales et minimales agissant dans le volume entourant la zone de faille, τ est la contrainte de cisaillement dans le plan de faille, σ_n est la contrainte normale à la faille, μ_s est le coefficient de friction statique et P_f est la pression des fluides dans la masse rocheuse.

3. Ce modèle classique est-il universel ?

Dans les régions où les déformations tectoniques sont importantes, la variation temporelle de la contrainte de cisaillement τ agissant sur la faille est plus importante que la variation de la contrainte normale σ , tandis que les variations du coefficient de friction et de la pression des fluides sont considérées comme très faibles. Le modèle classique décrivant le déclenchement des tremblements de terre est basé sur ces hypothèses. Il explique relativement bien la cyclicité moyenne des grands tremblements de terre aux limites des plaques.

Cependant, Sibson (1990) montre que l'instabilité des failles peut également se produire par une augmentation de la pression des fluides, réduisant la contrainte normale effective sur la faille, ou par diminution de la contrainte normale résultant d'une modification du chargement tectonique des failles (Figure 2).

D'autres processus modifiant l'état de contrainte agissant sur les failles peuvent également déclencher des séismes. Un mécanisme bien connu est la modification de la contrainte statique de Coulomb par une rupture de faille qui affecte d'autres failles dans le voisinage (King et al., 1994 ; Stein, 1999). Les ondes sismiques provenant de tremblements de terre lointains peuvent également créer des changements soutenus de la pression des eaux souterraines suffisamment importants pour déclencher la sismicité (Brodsky et al., 2003). De plus, les zones intracontinentales sont des volumes tridimensionnels. Le chargement des failles est plus complexe qu'aux frontières des plaques, car les systèmes de failles diffus doivent s'accommoder collectivement de taux de déformation tectonique lents, et les ruptures sismiques des grands tremblements de terre modifient les contraintes sur les failles voisines et/ou altèrent le chargement tectonique à plus grande distance (Liu et Stein, 2016).

4. Le rôle de la pression des fluides sur le déclenchement des tremblements de terre

Ce rôle est largement admis dans la communauté scientifique. La première preuve est fournie par la sismicité induite par les grands réservoirs d'eau. Il existe de nombreux exemples de séismes survenant après la première mise sous eau d'un réservoir artificiel proche (Gupta et Rastogi, 1976). Le plus grand tremblement de terre de ce type est celui de Koyna, en Inde, le 10 décembre 1967, avec une magnitude $M_w=6,3$. Les discussions autour du déclenchement possible du tremblement de terre de Wenchuan (Chine) du 12 mai 2008 $M_w = 7,9$ qui a tué 90.000 personnes, par la mise en eau d'un grand réservoir en 2005, ouvrent la possibilité que des tremblements de terre d'origine humaine de plus grande magnitude puissent se produire (Ge

et al., 2009 ; Zhou et al., 2010). Talwani et Acree (1985) ont décrit ces tremblements de terre induits par les réservoirs comme résultant d'un processus de diffusion de la pression des fluides dans la croûte terrestre qui réduit la résistance de la faille ou de création d'un effet chimique réduisant le coefficient de friction de la faille. L'injection de fluides pendant l'exploitation minière et la récupération du pétrole provoque également une augmentation de la pression des fluides qui peut être à l'origine de tremblements de terre (Zoback et Harjes, 1997). L'exemple le plus illustratif est l'augmentation spectaculaire de la sismicité dans le centre des États-Unis depuis 2008, principalement due à l'injection d'eaux usées résultant de l'extraction de pétrole et de gaz. De nos jours, cette sismicité engendre un risque important en Oklahoma (Brooks et al., 2017). Le séisme le plus fort dans cette région s'est produit en 2016 et a atteint $M_w=5,8$ (Chen et al., 2017). Certaines analyses suggèrent également une activité sismique similaire induite par l'industrie en frontière de plaques. Par exemple, Hough et Page (2016) fournissent des évidences que les séismes modérés dans le bassin de Los Angeles, y compris le séisme de $M_w=6,4$ à Long Beach en 1933 pourraient être liés au boom pétrolier dans cette région entre 1915 et 1932.

5. La cause des tremblements de terre en régions continentales stables

L'importance croissante des risques associés aux tremblements de terre modérés en RCS a conduit ces 15 dernières années à des recherches spécifiques pour mieux comprendre leurs causes. Une partie de ces recherches a été publiée dans deux volumes publiés respectivement par la « Geological Society of America » (Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues, edited by S. Stein and S. Mazzotti ; 2007) et les « Cambridge University Press » (Intraplate Earthquakes, edited by P. Talwani ; 2014).

Récemment, Calais et al. (2016) expliquent les grands séismes en RCS à la lumière de leurs distribution spatiale et temporelle et de l'absence de mouvements tectoniques dans les mesures de géodésie spatiale et les études paléoséismologiques. Ces auteurs mettent en évidence le rôle des variations transitoires du champ de contrainte crustal régional ou de la résistance des failles dans leur initiation. Etant donné les taux de déformations quasi inexistant en RCS, ces variations jouent un rôle beaucoup plus déterminant dans le déclenchement des tremblements de terre que dans les régions actives (Figure 3).

En raison des très faibles taux de déformation tectonique, les grands séismes libèrent une partie significative de l'énergie de déformation accumulée à très long terme par l'action du champ de contrainte intracontinental (Craig et al., 2016). Pour cette raison, ce réservoir d'énergie de déformation crustale est fortement appauvri après l'occurrence d'un grand

tremblement de terre et un temps très long est nécessaire pour le réapprovisionner suffisamment et fournir un environnement favorable à la genèse d'autres grands tremblements de terre. Cela expliquerait pourquoi les grands séismes et la sismicité associée en RCS ne se répètent pas nécessairement au même endroit, contrairement à ce qui se passe aux frontières de plaques où les grands séismes semblent se reproduire plus ou moins régulièrement sur les mêmes failles actives parce que l'énergie mécanique au niveau de la zone de faille augmente progressivement après chaque grand tremblement de terre (Figure 3).

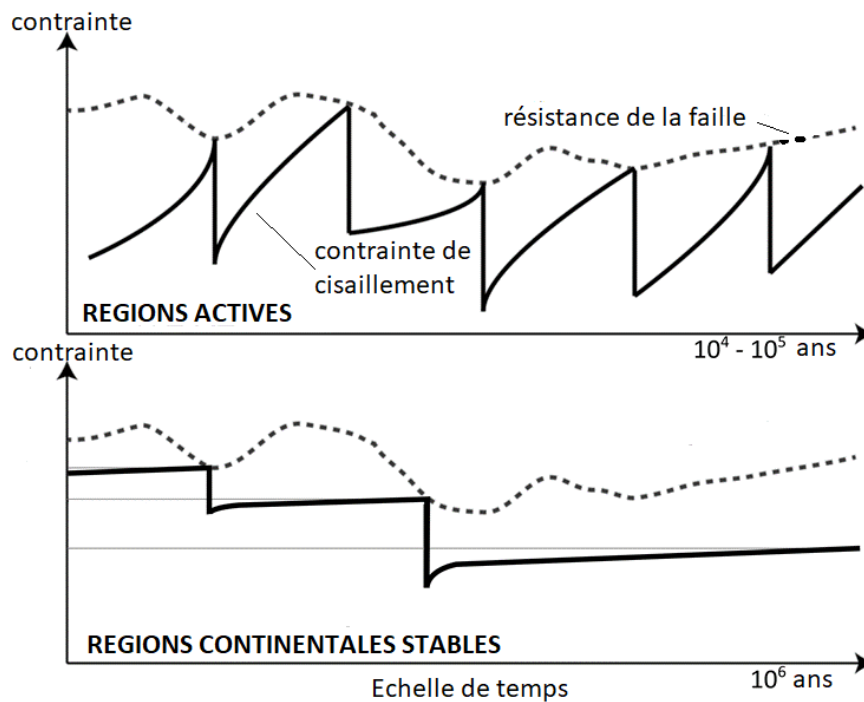


Figure 3 : Différences de relaxation sismique entre les régions en limites de plaques et les régions continentales stables [explication au paragraphe 5].

6. Sismicité induite par l'activité humaine versus sismicité naturelle en RCS

Les perturbations des contraintes ou de la résistance des failles à l'origine de l'activité sismique dans les RCS peuvent être liées à des phénomènes environnementaux naturels (voir les exemples dans Bilham et al., 2003 ; Calais et al., 2010 ; Craig et al., 2016 ; González et al., 2012), mais aussi à des activités humaines comme le remplissage de réservoirs d'eau ou l'injection de fluides à des fins industrielles l'ont mis en évidence (Gupta et Rastogi, 1976 ; Zoback et Harjes, 1997). Dès lors, une conséquence de la disponibilité limitée de l'énergie de déformation dans le RCS serait que l'occurrence de séismes modérés ou importants liés aux activités humaines dans des régions dont l'activité sismique antérieure est inconnue pourrait être la seule activité sismique réelle à cet endroit, et ce pendant une longue période. Le nombre croissant d'observations de la sismicité associée aux activités humaines conduit également à se

demander si cette sismicité induite pourrait être plus fréquente qu'on ne l'estime actuellement ou même représenter le principal risque sismique dans certaines RCS. Jusqu'à récemment, le rôle de cette activité sismique induite par l'homme était considéré comme anecdotique. La nouvelle perspective sur la sismicité du RCS donnée par Calais et al. (2016) change cette idée largement répandue (Camelbeeck et al., 2017).

Les séismes déclenchés par l'activité humaine ont principalement été reconnus au moins depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle par l'observation d'une activité sismique associée au remplissage de réservoirs d'eau artificiels dans de nombreuses régions du monde (Gupta et Rastogi, 1976). Par ailleurs, l'activité sismique induite par l'injection de fluides à des fins industrielles est devenue une préoccupation majeure dans les pays développés comme l'Europe et l'Amérique du Nord depuis le début du 21^{ème} siècle (Ellsworth, 2013).

L'identification de l'activité sismique induite par l'homme est facilitée lorsqu'elle se produit dans des zones d'activité sismique faible ou absente. C'est le cas dans le centre de l'Inde où le nombre de tremblements de terre destructeurs et de décès associés a augmenté de manière significative depuis 1960 (Bilham et al., 2003). Le tremblement de terre de Koyna du 10 décembre 1967 ($M_w = 6,3$) qui s'est produit dans cette région a causé environ 200 morts et plus de 1500 blessés et est le plus fort tremblement de terre connu associé au remplissage du réservoir d'un barrage. La preuve de la relation entre les tremblements de terre et le réservoir de Koyna est établie car l'activité sismique a commencé peu après le remplissage du réservoir qui a débuté en 1962, alors qu'aucune activité sismique n'était connue dans la région, et les tremblements de terre induits ont continué à se produire jusqu'à aujourd'hui en suivant les variations du niveau du réservoir (Gupta et al., 1997). Le tremblement de terre de Killari, $M_w=6,1$, qui est le plus récent tremblement de terre meurtrier en RCS, s'est produit dans la même zone à plus ou moins 500 km à l'est. Il s'est également produit deux ans et demi après la première mise en eau d'un réservoir voisin et un an après un essaim de sismicité très probablement initié par le remplissage du réservoir. Ces observations ont conduit Seeber et al. (1996) à suggérer un possible déclenchement du tremblement de terre par l'homme. Ces deux séismes sont les plus importants observés dans la péninsule indienne stable et représentent un marqueur clair que la sismicité connue de cette région stable serait directement contrôlée par la sismicité induite par les réservoirs.

Une autre région où l'activité sismique a augmenté récemment de façon spectaculaire est le centre des États-Unis, principalement en raison de l'injection d'eaux usées provenant de l'extraction de pétrole et de gaz (Ellsworth, 2013). Cette activité comprend plusieurs séismes $M_w > 5,0$ qui ont causé des dommages importants (Keranen et al., 2013). Par conséquent, même

si de nombreux puits sont apparemment asismiques, la gestion des activités d'injection pour réduire le danger a été recommandée aux industriels (Mc Garr et al., 2015). Par exemple, en installant des systèmes contrôlant les niveaux d'activité sismique et en établissant des seuils pour réduire les taux d'injection ou arrêter l'injection. Néanmoins, le contrôle des processus industriels peut ne pas être suffisant dans certains cas spécifiques, comme l'indiquent Chen et al. (2017) qui ont apporté la preuve que le plus grand événement de $M_w = 5,8$ en Oklahoma s'est produit comme une interaction entre l'injection, les failles tectoniques et les séismes précurseurs, démontrant la complexité des processus de transfert de contrainte à l'intérieur de la croûte.

Dans les exemples de l'Oklahoma et du centre de l'Inde, la preuve du rôle prépondérant de la sismicité induite par l'homme est facilitée par l'absence d'activité sismique antérieure, ce qui permet de suspecter le lien entre les séismes et l'activité humaine. Dans d'autres régions stables du monde, la sismicité et les grands séismes sont plus continus depuis des périodes historiques. Il est donc plus difficile d'établir un lien entre les tremblements de terre et l'activité industrielle actuelle dans ces régions, car l'emplacement et le moment de cette activité sismique ne coïncident pas nécessairement avec l'activité humaine et (ou) pourraient être cachés par l'activité sismique naturelle. Il n'est donc pas impossible que l'activité sismique d'origine humaine jouerait un rôle beaucoup plus important dans la sismicité récente et actuelle du RCS que ce qui est admis actuellement.

7. Conclusion

Il est difficile de nier que l'activité sismique d'origine humaine est actuellement à l'origine du principal risque sismique dans certaines RCS, comme le centre des États-Unis ou la péninsule indienne. De manière plus générale, elle serait un risque majeur dans de nombreuses RCS, en particulier là où il n'y a pas d'activité sismique antérieure. En effet, l'apparition de tremblements de terre modérés ou importants provoqués par l'homme pourrait anticiper l'apparition à très long terme de tremblements de terre naturels et inhiber ou retarder fortement d'éventuels grands tremblements de terre naturels futurs en réduisant considérablement le réservoir régional d'énergie de déformation accessible.

Bien sûr, des processus naturels expliquent l'apparition de la sismicité des RCS avant l'avènement des processus liés à l'activité humaine capables de déclencher des séismes, et continueraient d'être à l'origine d'une partie, souvent importante, de l'activité actuelle dans de nombreux autres RCS. Par conséquent, l'évaluation de la part actuelle de l'activité sismique

induite par l'homme dans la sismicité de ces régions contribuerait à mieux diagnostiquer les problèmes potentiels de l'activité industrielle future sur la sismicité.

Références

Bilham, R., Bendick, R., and Wallace, K. (2003). Flexure of the Indian plate and intraplate earthquakes. *Journal of Earth System Science*, 112 (3), 315-329, doi: 10.1007/BF02709259.

Bilham, R. (2009). The seismic future of cities. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7, 839-887, doi: 10.1007/s10518-009-9147-0.

Brodsky, E.E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., and Manga, M (2003). A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 108, B8, 2390, doi: 10.1029/2002JB002321.

Brooks, E.M., Stein, S., Spencer, B.D., Saldich, L., Petersen, M.D., and McNamara, D. (2017). Assessing earthquake hazard map performance for natural and induced seismicity in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, doi: 10.1785/0220170124.

Calais, E., Freed, A.M., Van Arsdale, R., and Stein, S. (2010). Triggering of New Madrid seismicity by late-Pleistocene erosion. *Nature Geosciences*, 466(7306), 608-611. doi:10.1038/nature09258

Calais, E., Camelbeeck, T., Stein, S., Liu, M. and Craig, T.J. (2016). A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. *Geophysical Research Letters*, 43, doi: 10.1002/2016GL070815.

Camelbeeck, T., Vanneste, K. and Lecocq, T. (2017). Natural and man-induced destructive earthquakes in stable continental regions. *Bulletin des séances de l'Académie royale des sciences d'outre-mer*, 63, 321-340. doi: 10.5281/zenodo.3894460

Chen, X., Nakata, N., Pennington, C., Haffener, J., Chang, J.C., He, X., Zhan, Z., Ni, S., and Walter J.I. (2017). The Pawnee earthquake as a result of the interplay among injection, faults and foreshocks. *Scientific Reports*, 7, 4946, doi: 10.1038/s41598-017-04992-z.

Craig, T.J., Calais, E., Fleitout, L., Bollinger, L., and Scotti, O. (2016). Evidence for the release of long-term tectonic strain stored in continental interiors through intraplate earthquakes, *Geophysical Research letters*, 43, doi: 10.1002/2016GL069359.

Crone, A.J., Machette, M.N., and Bowman, J.R. (1997). Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and

North American quaternary faults. *Australian Journal of Earth Science*, 44(2), 203-214. doi: 10.1080/08120099708728304

Ellsworth, W.L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341, doi: 10.1126/science.1225942

EPRI, U.S. DOE, and U.S. NRC, 2012, Central and Eastern United States Seismic Source Characterization for Nuclear Facilities: NUREG-2115.

Ge, S., Liu, M., Lu, N., Godt, J.W., and Luo, G. (2009). Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake ? *Geophysical Research Letters*, 36, L20315, doi: 10.1029/2009GL040349.

González, P.J., Tiampo, K.F., Palano, M., Cannavo, F., and Fernández, J. (2012). The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO1610.

Gupta, H.K., and Rastogi, B.K. (1976). *Dams and earthquakes*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Gupta, H.K., Rastogi, B.K., Chadha, R.K., and Sarma, C.S.P. (1997). Enhanced reservoir-induced earthquakes in Koyna region, India, during 1993-95. *Journal of seismology*, 1, 47-53. doi: 10.1023/A:1009742428657

T. C. Hanks et H. Kanamori (1979). Moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no B5, p. 2348-2350

Hough, S.E., and Page, M. (2016). Potentially induced earthquakes during the early twentieth century in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, doi: 10.1785/0120160157.

Johnston, A. C. (1989), The seismicity of 'Stable Continental Interiors', in *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, pp. 299–327, Springer, Netherlands, Dordrecht.

Kanamori, H. and Brodsky, E. (2004). The physics of earthquakes. *Rep. Progress Phys*, 67(8), 1429-1496. doi: 10.1088/0034-4885/67/8/R03

King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (3), 935-953. doi: 10.1785/BSSA0840030935

Liu, M., and Stein, S. (2016). Mid-continental earthquakes: spatiotemporal occurrences, causes, and hazards. *Earth Science Reviews*, 162, 364-386, doi: 10.1016/j.earscirev.2016.09.016

Mc Garr, A., Bekins, B., Burkardt, N., Dewey, J., Earle, P., Ellsworth, W., Ge, S., Hickman, S., Holland, A., Majer, E., Rubinstein, J., and Sheehan, A. (2015). Coping with earthquakes induced by fluid injection. *Science*, 347, 830-831. doi: 10.1126/science.aaa0494.

Seeber, L., Ekström, G., Jain, S.K., Murty, C.V.R., Chandak, N., and Armbruster, J.G. (1996). The 1993 Killari earthquake in central India: a new fault in Mesozoic basalt flows? *Journal of Geophysical Research*, 101, B4, 8543-8560. doi: 10.1029/95JB01865

Sibson, R. (1990). Rupture nucleation on unfavorably oriented faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80, 1580-1604. doi: 10.1785/BSSA08006A1580

Stein, R.S. (1999). The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402, 605-609. doi: 10.1038/45144

Stein, S. and Mazzotti, S. (editors) (2007). *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*. The Geological Society of America, special paper 425, 26 contributions, 42 pages. doi: 10.1130/SPE425

Talwani, P., and Acree, S. (1985). Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *PAGEOPH*, 122, 947-965. doi: 10.1007/BF00876395

Talwani, P. (editor) (2014). *Intraplate Earthquakes*. Cambridge University Press, 13 contributions, 338 pages. <https://www.cambridge.org/9781107040380>

Zoback, M.D., and Harjes, H.-P. (1997). Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *Journal of Geophysical Research*, 102, B8, 18,477-18,491. doi: 10.1029/96JB02814

Zhou, S., Deng, K., Zhao, C., and Cheng, W. (2010). Discussion on Was the 2008 Wenchuan earthquake triggered by Zipingpu Reservoir? *Earthq Sci*, 23, 577-581, doi: 10.1007/s11589-010-0757-z.