

Résumé de Thèse de Doctorat de Mohamed Reda SBEINATI
EOST - IPG Strasbourg

Titre : Sismicité historique, paléo-archéosismologie et évaluation de l'aléa sismique le long de la faille du Levant en Syrie

Ce travail de thèse a pour objectif d'étudier les séismes majeurs de la zone de faille du Levant (ou faille de la Mer Morte) en Syrie occidentale. La région du Moyen Orient est une des rares zones actives qui bénéficient d'un riche catalogue de sismicité historique (avec des séismes qui datent de plusieurs siècles avant JC). Plusieurs travaux sur l'activité sismique historique et contemporaine en Syrie et régions avoisinantes indiquent l'occurrence de forts séismes destructeurs notamment le long de la faille du Levant. Cependant, et malgré les importantes contributions à l'étude des caractéristiques de cette sismicité, une somme considérable de documents est restée inexploitée et un catalogue paramétrique nécessaire pour l'évaluation de l'aléa sismique restait à préparer.

La sismicité de la Syrie aurait pu être qualifiée de tout à fait modérée si on se limite à l'activité pendant les 2 derniers siècles. En effet, les événements sismiques instrumentaux ($5 < M_s < 6$) se concentrent au nord à l'intersection de la faille du Levant avec la faille Est-Anatolienne. Plus au sud, une zone de lacune sismique apparaît entre la vallée (bassin en « pull-apart ») du Ghab et les monts du Liban (zone en transpression).

Les mécanismes focaux (CMT Harvard) des séismes récents indiquent des axes P de direction NNW-SSE liés à des failles décrochantes. Ces mécanismes illustrent la déformation active et la présence de failles décrochantes de direction Nord-Sud accompagnées de failles normales associées aux bassins en « pull-apart ». Les vitesses de déformation obtenues par la géodésie spatiale (GPS) varient de 5.6 to 7.5 mm/an en accord avec les récentes investigations paléosismiques et archéosismiques. En parallèle, d'autres questions sur le cycle sismique, la segmentation et la période de récurrence des forts séismes le long de la faille du Levant au nord du Liban restent posées.

Cette thèse traite des aspects de l'activité sismique à long terme le long de la faille du Levant et apporte quelques réponses sur le comportement des ces failles à travers les recherches que j'ai entrepris par des études de terrain couplées avec l'analyse des documents historiques. D'autre part, ce travail a été effectué notamment dans le cadre du projet européen APAME (projet réalisé de mars 2003 à septembre 2006 et intitulé « *Archéo-Paleoseismology for the protection of cultural heritage in the Middle East* » (EC contract ICA-CT-2002-10024). En outre depuis 1999 et dans le cadre de mon activité professionnelle, j'ai également contribué au projet "Seismic Data for Siting and Site-Revalidation of Nuclear Facility" sous le patronage de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA, Vienne) pour l'étude de 181 événements sismiques historiques (voir Chapitre IV).

Les problèmes de la sismicité épisodique en Syrie et les observations de terrain (faille et sites archéologiques) ont motivé mon intérêt à l'analyse de la sismicité historique, aux travaux de paléosismicité et d'archéosismicité, et à l'évaluation de l'aléa sismique dans la région.

Cette thèse s'organise suivant 5 chapitres principaux accompagnés d'un chapitre introductif, d'un chapitre de conclusions générales avec en annexe les articles publiés (ou en voie de publication) et rapports préparés dans le cadre de mes travaux de recherche.

Après le premier **chapitre I** Introduction qui présente essentiellement les motivations et le contexte de ce travail, le **chapitre II** intitulée « *Active faults and their relationships to earthquakes* » traite des aspects fondamentaux de la rupture sismique et des déformations de surface. Les méthodes et procédures d'étude des documents historiques dans le contexte des anciennes civilisations sont exposées en parallèle aux évaluations des intensités macrosismiques. Je présente également les principes et approches de la paléosismologie et de l'archéosismologie et l'intégration des données historiques et géologiques dans l'évaluation de l'aléa sismique.

Le **chapitre III** présente le contexte sismotectonique de la région libano-syrienne et du sud de la Turquie. J'analyse dans cette partie la géodynamique et les mécanismes au foyer et leur signification par rapport au domaine tectonique (bâti géologique, tectonique Mio-Pliocène et Quaternaire), du volcanisme, des caractéristiques de la lithosphère continentale et de la relation plaque Arabe et Afrique le long de la faille du Levant.

Le **chapitre IV** traite de la sismicité historique depuis 1365 avant JC à 1900 ; ce travail a fait l'objet d'une publication dans *Annals of Geophysics* :

Sbeinati M. R., R. Darawcheh and M. Mouty, (2005), The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. *ANNALS OF GEOPHYSICS* 48, N. 3, June 2005, pp. 347-435.

Les sources originales ont été identifiées et étudiées pour la préparation d'un catalogue paramétrique unifié et homogène. J'ai étudié 181 séismes historiques et évalué les intensités macrosismiques de chaque localité liées aux événements les plus significatifs en utilisant les méthodes et échelles standards (EMS-92, EMS-98) telle qu'employées en Italie, Russie, Royaume Uni et Iran. De nombreux documents en Arabe, Latin, Byzantin et Assyrien ont fait l'objet d'un examen détaillé pour l'identification de séismes historiques non mentionnés dans les travaux précédents. J'ai étudié en particulier les descriptions détaillées des effets liés aux séismes majeurs telles que rapportées dans les sources arabes. Ces effets comprennent les séismes précurseurs, les répliques, les ruptures en surface, la liquéfaction des sols, les glissements de terrain, les tsunamis, les feux et les dégâts des constructions. Un catalogue paramétrique de 36 séismes majeurs est préparé incluant les localisations épicentrales, les intensités maximum et minimum ($V \leq I_0 \leq IX$) et les magnitudes estimées. Les calculs effectués pour ce catalogue indiquent des paramètres complétés pour des magnitudes $M_s > 6.5$ et constituent une contribution considérable pour une évaluation réaliste de l'aléa et du risque sismiques en Syrie.

Le **chapitre V** traite des travaux en archéosismologie et paléosismologie effectués sur des sites spécifiques favorables à l'étude du comportement à long terme des ruptures sismiques.

Auparavant, un inventaire des sites archéologiques affectés par des tremblements de terre est présenté en **Annexe 2** après une introduction dédiée à la nomenclature et typologie des effets des séismes sur les constructions anciennes. J'ai pu décrire plus de 10 sites qui montrent des indices de destruction que j'attribue à des sollicitations sismiques. Les évidences de terrain montrent des décrochements latéraux de pierres de taille, des ruptures à travers les murs et pierres de taille, des basculements et torsions de constructions et effondrements d'édifices. L'ensemble des sites étudiés est situé le long de la faille du Levant et chaque site a

livré un âge et un degré de destruction suivant la classification des intensités de l'échelle EMS-92 et EMS-98.

Etant donné mon implication dans les études de l'aqueduc faillé d'Al Harif, je présente les investigations détaillées des excavations, tranchées et analyse des carottes de travertins-tufa accumulés sur les parois de l'édifice Romain. Une publication est en révision :

Sbeinati et al., (2010), Timing of Earthquake Ruptures at the Al Harif Roman Aqueduct (Dead Sea fault, Syria) from Archeoseismology, Paleoseismology and Tufa Cores, submitted to Geological Society of America Bulletin, Special Issue on "Ancient Earthquake" (in revision).

Ces études et analyses rendent compte directement des caractéristiques de la faille et du cycle sismique associé au cours des derniers 3000 ans.

Les ruptures cosismiques découvertes dans le « Krak des Chevaliers » est le deuxième exemple qui illustre la déformation sismique sur un site archéologique important (classée monument historique). La datation de l'effondrement des colonnes de l'Agora dans la ville archéologique Apamea (2 - 3ème siècle avant JC) livre des évidences sur l'occurrence de séismes majeurs anciens non répertoriés dans les catalogues. Les fouilles archéologiques sur la destruction d'un monastère byzantin à Deir Dahess rend compte de l'intensité du séisme historique de 526. L'ensemble de ces travaux a bénéficié de plus de 70 datations au C14 et m'a permis de compléter le catalogue de sismicité pour la période antérieure à la civilisation byzantine.

L'intégration de la sismicité historique avec les données archéosismologiques et paléosismologiques pour l'évaluation de l'aléa sismique constitue la majeure partie du **chapitre VI**. Un traitement statistique de la sismicité historique et instrumentale suivant la loi Gutenberg-Richter nous livre la fréquence des séismes en fonction de la magnitude. Cette analyse est couplée par une détermination de la période de récurrence des séismes majeurs contrainte par les résultats des études archéosismologiques et paléosismologiques. Le couplage des approches déterministes et probabilistes est utilisé pour le calcul de l'aléa sismique. La possibilité de réaliser des cartes isoséistes pour des séismes historiques a rendu possible le calcul d'une loi d'atténuation pour la Syrie occidentale. La prise en compte des caractéristiques des ruptures sismiques (initiation et terminaison en fonction de la géométrie des failles) m'a aidé au développement de modèles de mouvement et accélération des sols et à l'établissement de cartes d'iso-accélération. Ces cartes et la période de récurrence des forts séismes constituent un élément important dans le calcul de l'aléa sismique le long de la faille du Levant en Syrie.

En conclusion (**chapitre VII**), les travaux de cette thèse montrent essentiellement l'importance de l'approche pluridisciplinaire dans l'étude des séismes historiques et ruptures sismiques associées. En effet, la combinaison des travaux sur les archives historiques avec les approches en sismologie, paléosismologie, archéosismologie et évaluation de l'aléa sismique a été nécessaire pour comprendre la répartition spatiale et temporelle de la sismicité le long de la faille du Levant. L'ensemble des sites historiques et archéologiques étudié a permis de mieux contraindre les effets des séismes sur les constructions et édifices et leur degré de destruction. L'établissement de cartes isoséistes pour des séismes historiques n'a été possible que grâce à la richesse des descriptions contenues dans les différentes archives. La segmentation de la faille (suivant les discontinuités géométriques), la répartition des destructions liées aux séismes historiques et les évidences des déplacements historiques et pré-historiques m'a permis d'établir la relation entre des ruptures cosismiques historiques et les caractéristiques des segments de faille. Plusieurs séismes auparavant décrits dans les

sources historiques ont été identifiées dans les sites archéologiques et dans les tranchées paléosismologiques. L'intégration des différentes données et résultats a également permis une meilleure évaluation de l'aléa sismique en Syrie occidentale.

En annexe, je présente les différents travaux publiés ou en voie de publication dans des revues de rang A:

Annexe 1: Publications

- Sbeinati M. R., R. Darawcheh, and M. Mouty (1994). Field archeological evidences of seismic effects in Syria, in Materials of the CEC Project “*Review of Historical Seismicity in Europe*” – vol. 2., Albini P. and A. (edit.), CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano, Italy.
- Darawcheh, R., **Sbeinati, M.R.**, Margottini, C., and Paolini, S., (2000), The 9 July 551 A.D. Beirut earthquake, eastern Mediterranean region: *Journal of Earthquake Engineering*, v. 4, p. 403–414, doi: 10.1142/S1363246900000229.
- Meghraoui, M., Gomez, F., **Sbeinati, R.**, Van der Woerd, J., Mouty, M., Darkal, A., Radwan, Y., Layyous, I., Najjar, H., M., Darawcheh, R., Hijazi, F., Al-Ghazzi, R., & Barazangi, M., (2003), Evidence for 830 years of seismic quiescence from paleoseismology, archeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria, *Earth. Planet. Sci. Letters* 210, 35-52.
- Gomez, F., Meghraoui, M., Darkal, A., **Sbeinati, R.**, Darawcheh, R., Tabet, C., Khawlie, M., Charabe, M., Khair, K., and Barazangi, M., (2001), Coseismic displacements along the Serghaya Fault: an active branch of the Dead Sea Fault System in Syria and Lebanon, *J. Geol. Soc. London* 158, 405 – 408.

Annexe 2: Rapport

- Sbeinati, M. R., R. Darawcheh (1997). Archaeological evidences of earthquake damage in Syria”, Atomic Energy Commission of Syria, (A report presented to the International Atomic Energy Agency under the research project entitled Seismic data for siting and site revalidation of nuclear facilities, No. 6247/R3/RB), 1997.