

RÉSUMÉ

De nombreuses observations faites lors de séismes précédents ont mis en évidence l'influence du comportement humain sur le risque sismique (L'Aquila 2009 ; Great East Japan 2011 ; Lorca 2011). Les actions, ou même l'inaction, des individus peuvent avoir des effets néfastes sur les conséquences sociales d'un séisme. Pourtant, les méthodologies d'évaluation des risques sismiques prennent rarement en compte le comportement humain. Cette thèse explore comment la modélisation des comportements humains et de la mobilité dans un environnement post-séisme peut contribuer à la définition d'indices de risque sismique dynamiques qui intègrent le comportement humain.

Nous adoptons une approche interdisciplinaire, fusionnant les sciences de la terre, les sciences sociales et l'informatique, pour modéliser le risque sismique en tenant compte de ses aspects physiques et sociaux. Plus précisément, nous développons un modèle à base d'agents pour la simulation de l'évacuation des piétons en cas de séisme (PEERS). PEERS intègre des composantes physiques réalistes liées aux dommages causés aux bâtiments et aux débris qui en résultent. La composante sociale est prise en compte en intégrant les réponses comportementales, représentées par les décisions d'évacuation et de mobilité et les interactions entre individus qui aboutissent à la formation de groupes.

Nous choisissons Beyrouth, au Liban, comme zone d'étude et recréons un environnement virtuel de crise sismique. Nous définissons deux scénarios sismiques : le premier correspond à l'accélération maximale au sol (PGA) réglementaire de 0,3 g et le second à une PGA de 0,5 g. Nous construisons une base de données de bâtiments pour Beyrouth, puis nous estimons les dommages aux bâtiments pour les scénarios sismiques définis à l'aide de réseaux neuronaux artificiels. Pour estimer les débris induits par les dommages, nous développons une approche pour prédire la distribution des débris autour d'un bâtiment en fonction de son niveau de dommage. Nous définissons des espaces ouverts, c'est-à-dire des zones éloignées des bâtiments où les individus sont en sécurité, et nous identifions les contraintes dans l'environnement urbain qui pourraient affecter la mobilité des piétons. De plus, nous recréons une population synthétique d'individus et de ménages qui reproduit les données disponibles sur la population de Beyrouth. Enfin, nous calibrons les réponses comportementales dans PEERS sur la base des données d'enquête de l'explosion du 4 août 2020 dans le port de Beyrouth.

Nous effectuons plusieurs simulations d'évacuation en cas de tremblement de terre dans cet environnement virtuel et nous examinons la sécurité des personnes à la suite d'un tremblement de terre, la sécurité étant définie comme le fait de se trouver dans un espace ouvert. Nous étudions la capacité des espaces ouverts de Beyrouth à fournir un abri à la population immédiatement après un tremblement de terre. Nous étudions également les effets d'environnements physiques et sociaux plus complexes sur l'arrivée de la population dans des zones sûres.

Nous constatons qu'à Beyrouth, la distribution des espaces ouverts en termes de taille et d'emplacement ne peut assurer la sécurité de toute la population, même dans des conditions idéales avec des contraintes sociales et physiques minimales. En outre, nous constatons que les débris et les comportements humains retardent tous les deux de manière significative les temps d'arrivée aux espaces ouverts. Cependant, le comportement humain retarde les arrivées de deux fois par rapport au retard causé uniquement par la présence de débris.

Une approche similaire peut être adoptée pour identifier et classer les composants physiques et sociaux d'un indice de risque sismique dynamique.

ABSTRACT

Numerous observations from previous earthquakes highlighted the influence of human behavior on seismic risk (L'Aquila 2009; Great East Japan 2011; Lorca 2011). Individuals' actions, or even inaction, may have detrimental effects on the social consequences of an earthquake. Yet, seismic risk assessment methodologies rarely take into account human behavior. This thesis explores how modeling human behaviors and mobility in a post-earthquake environment can contribute to the definition of dynamic seismic risk indices that integrate human behavior.

We adopt an interdisciplinary approach, merging earth, social and computer sciences, to model seismic risk while accounting for both its physical and social aspects. Specifically, we develop an agent-based model for the simulation of pedestrian earthquake evacuation (PEERS). PEERS integrates realistic physical components related to building damages and resulting debris. The social component is taken into account by integrating behavioral responses, represented by the evacuation and mobility decisions and the interactions between individuals that result in the formation of groups.

We choose Beirut, Lebanon as a study area and recreate a virtual seismic crisis environment. We define two seismic scenarios: the first one corresponding to the regulatory Peak Ground Acceleration (PGA) of 0.3 g and the second one corresponding to a PGA of 0.5 g. We construct a building database for Beirut, and then estimate the building damages for the defined seismic scenarios using Artificial Neural Networks. To estimate the damage-induced debris, we develop an approach to predict the distribution of debris around a building according to its damage level. We define open spaces, i.e. areas away from buildings where individuals are safe, and identify the constraints in the urban environment that might affect pedestrians' mobility. Moreover, we recreate a synthetic population of individuals and households that replicates the available data on Beirut's population. Finally, we calibrate the behavioral responses in PEERS based on survey data from the August 4, 2020 explosion at the port of Beirut.

We run several earthquake evacuation simulations in this virtual environment, and look at people's safety in the aftermath of an earthquake, with safety defined as being in an open space. We investigate the capacity of the open spaces in Beirut for providing shelter for the population in the immediate aftermath of an earthquake. We also investigate the effects of more complex physical and social environments on the population's arrivals to safe areas.

We find that in Beirut, the distribution of open spaces in terms of size and location cannot ensure the safety of all of the population, even in ideal conditions with minimal social and physical constraints. Furthermore, we find that debris and human behaviors both significantly delay the arrival times to open spaces. Yet, the human behavior delays the arrivals by two times compared to the delay caused only by the presence of debris.

A similar approach can be adopted to identify and rank physical and social components of a dynamic seismic risk index.