

Les effets des répliques sismiques sur le cycle de vie d'un remblai et sa fondation liquéfiable

Christina Khalil^{1,2}, Fernando Lopez-Caballero²

¹ ESITC Paris, 79 avenue Aristide Briand, 94110, Arcueil, France

² Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS) CNRS UMR-9026, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, École Normale Supérieure, Gif-sur-Yvette, France

RESUME

Durant leur vie utile, les structures subissent plusieurs séismes qui sont de type mainshocks ou aftershocks. En conséquence, le dommage induit s'accumule suite à ces séquences sismiques. Ce travail étudie la performance d'un remblai suite à des événements séquentiels de type mainshocks et aftershocks. En outre, il présente une nouvelle approche, inspirée du domaine de la médecine, pour estimer le cycle de vie de ce remblai et calculer sa probabilité de survivre aux événements en question. Le modèle constitutif du sol est le modèle de Hujieux qui est implémenté dans le code d'élément finis GEFDyn. Cette étude a trouvé que les dommages cumulés du remblai montrent l'importance de l'histoire de chargement du sol qui peut affecter sa performance temporelle et ainsi le rendre plus résistant aux secousses sismiques. En outre, la considération des répliques joue un rôle sur le comportement global du remblai durant sa vie utile.

Mots-clefs séquences sismiques, aftershocks, performance, cycle de vie, dommages cumulés

I. INTRODUCTION

Pour la conception d'une structure, et dans le but de considérer sa capacité à résister aux tremblements de terre, le *Pacific Earthquake Engineering Research Center* a proposé une méthodologie probabiliste prenant en compte les caractéristiques sismiques du site, l'évolution du dommage de la structure et sa vulnérabilité. L'élément essentiel de cette méthodologie est l'évaluation fiable du potentiel de dommages sismiques. Cependant, cette méthodologie présente encore une faiblesse concernant l'analyse du cycle de vie d'une structure à cause de la quantification des dommages à partir d'événements indépendants. Cependant, l'accumulation de dommage suite à des événements séquentiels ne sera pas prise en compte.

Par ailleurs, plusieurs analyses existent pour calculer ou estimer le cycle de vie d'une structure. L'analyse de Survie est une analyse inspirée du domaine de la médecine qui calcule la durée jusqu'à ce qu'un événement important ait lieu. Cette analyse modélise le temps restant avant la mort (ou le collapse) d'un système.

Dans la continuité du travail de Khalil and Lopez-Caballero (2021), le but de ce travail est d'étudier la performance d'un remblai construit sur une fondation liquéfiable. La sismicité et le

site d'étude sont identiques à ceux utilisés dans la référence citée. L'objectif de ce travail est de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les effets des répliques sur la performance du remblai ?
- Quelle est la probabilité de survie de ce remblai suite à différents types de séquences sismiques ?

Afin de répondre à ces questions, le modèle de comportement de sol utilisé est le modèle élastoplastique de l'ECP (Aubry et al., 1982 ; Hujoux, 1985), implanté dans le logiciel GEFDyn (Aubry and Modaressi, 1996). La génération des signaux est réalisée suivant le modèle stochastique de Rezaein and Der Kiureghian (2012) et les répliques sont calculées suivant la méthode de BASS (Branching Aftershock Sequence) (Turcotte et al., 2007). La durée de vie utile du remblai est de 100 ans.

II. GÉOMETRIE ET MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle éléments finis est composé d'un remblai construit sur deux couches de sables de caractéristiques et propriétés différentes. Le profil de sol utilisé est constitué de 4m de sable lâche et de 6m de sable dense. La surface libre de la nappe phréatique se trouve à 1m au-dessous de la surface du sol. On utilise un modèle bidimensionnel en déformations planes. La densité relative varie entre 50% et 60% et le module de cisaillement augmente avec la profondeur. La géométrie du modèle de référence proposé est montrée sur la Figure 1.

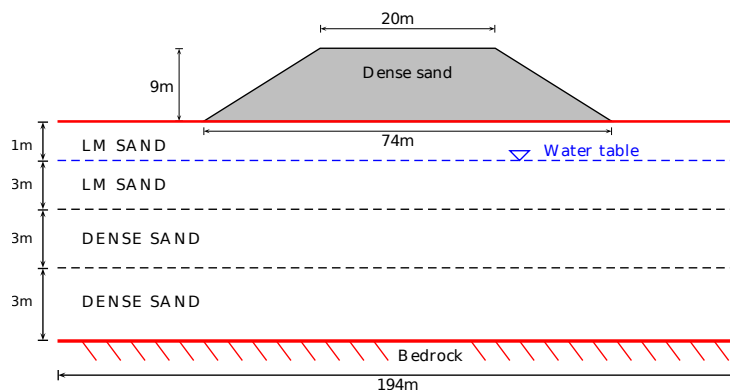


FIGURE 1. Géométrie du modèle

Dans ce travail, afin de modéliser le comportement des sols, le modèle de comportement élastoplastique de l'ECP, connu comme « modèle de Hujoux » (Aubry et al., 1982 ; Hujoux, 1985), implanté dans le logiciel GEFDyn (Aubry and Modaressi, 1996), sera utilisé. Les caractéristiques principales de ce modèle de comportement élastoplastique sont données ci-dessous.

Le modèle est écrit en termes de contraintes effectives de Terzaghi dans le cas des sols saturés. Il utilise un critère de rupture de type Coulomb et intègre le concept d'état critique. L'évolution de l'écroûissage dépend des déformations plastiques (déviatoire et volumique). Pour prendre en compte le comportement cyclique des sols, un écroûissage cinématique, fonction des variables d'état au dernier changement de sens de charge, est utilisé. L'influence de la déformation

volumique est prise en considération par l'intermédiaire de la pression critique, comme dans le modèle Cam-Clay. On se place dans le cadre de transformations infinitésimales.

III. HYPOTHÈSE DE L'ÉTUDE

Afin de réaliser cette étude, certaines hypothèses vont être prises :

- 1) L'effet des conditions incontrôlables comme la pluie ou le vent ne sont pas pris en compte.
- 2) Les calculs numériques débutent après la phase de construction du remblai, donc quand le remblai est dans son état initial qui n'a pas une histoire de chargement.
- 3) Le remblai ne subit pas de maintenance durant sa vie utile.

IV. MODÈLE DES RÉPLIQUES

Afin de générer les répliques, le modèle BASS (Branching Aftershock Sequence) est utilisé dans le cadre de ce travail (Turcotte et al., 2007). Ce modèle est intéressant puisqu'il prend en compte la dépendance de la magnitude sur le nombre de répliques créées et est plus généralisable que le modèle ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence).

Dans cette partie, on va présenter une comparaison statistique des différents mainshocks et aftershocks utilisés dans ce travail. Il faut préciser que les séquences de mainshocks sont les mêmes que ceux utilisés dans les travaux de Khalil and Lopez-Caballero (2021). L'analyse de l'aléa sismique (PSHA ; Probabilistic Seismic Hazard Analysis) est extraite de Aristizabal et al. (2018). Et le modèle synthétique de la génération des séismes est celui de Rezaein and Der Kiureghian (2012). Dans la suite de ce papier, la notation MS désigne mainshocks et AFS désigne aftershocks.

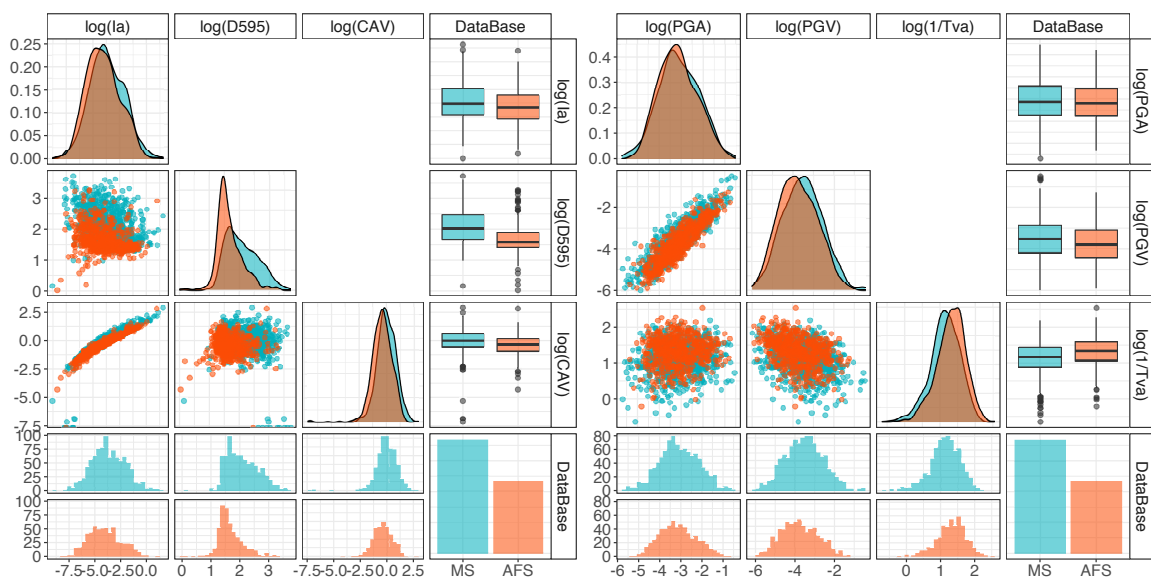


FIGURE 2. La distribution logarithmique de quelques caractéristiques sismiques des Mainshocks (MS) et Aftershocks (AFS) utilisés

Afin de comparer les caractéristiques de tous les MS et AFS utilisés, la Figure 2 montre sous forme matricielle les distributions de ces paramètres. La comparaison se fait en terme de i) la fonction de densité située sur la diagonale de la Figure, ii) les scatterplots et les histogrammes situés en bas à gauche de la Figure et iii) les boxplots situés à droite de celle-ci.

Concernant la fonction de densité, il est clair de la Figure 2 que la distribution des mainshocks et aftershocks se superpose pour la majorité des paramètres testés, à l'exception de la durée effective (D595). En plus, les boxplots indiquent que la valeur médiane des données est proche. Ce qui valide la correspondance des aftershocks pour leur mainshocks.

En synthèse de cette partie, il s'avère que les répliques générées ont des caractéristiques sismiques proches de leur mainshocks. Dans la suite, on va présenter les dommages cumulés suite à des séquences sismiques établis sur la durée de vie du remblai.

V. MESURE DE DOMMAGES SUITE À DES SÉQUENCES SISMIQUES

Dans cette partie, on teste l'utilisation des séquences sismiques pour l'identification de la performance du remblai concerné. Puisque la vie utile du remblai est 100 ans, et d'après l'analyse de l'aléa sismique de Aristizabal et al. (2018), 44 mainshocks vont avoir lieu. Les aftershocks correspondants vont être générés suivant le modèle de BASS et ainsi, 210 séquences de mainshocks et aftershocks ont été calculés. Chaque séquence a été permuté 10 fois afin d'avoir une grande base de données et effectuer des calculs non linéaires. En outre, pour le but de la dissipation de l'énergie après chaque séisme, un temps de repos a été garantie après chaque séismes. On note que l'état initial du chargement « n » débute avec les contraintes de l'état final du chargement « n - 1 ».

La performance du remblai sera étudiée à partir du tassement relatif cumulé de la crête ($\delta u/H$; ou u représente le tassement vertical et H la hauteur du remblai avec la fondation). Ce paramètre a été classifié en 4 niveaux de dommages : Pas de dommage, Mineur, Majeur ou Sérieux (Swaisgood, 2003 ; Lopez-Caballero and Khalil, 2018). La Figure 3 montre un exemple de l'évolution de ce paramètre durant des séquences de MS uniquement et pour ces mêmes séquences en leur ajoutant leurs correspondants AFS. Les niveaux de dommages sont aussi indiqués sur cette figure.

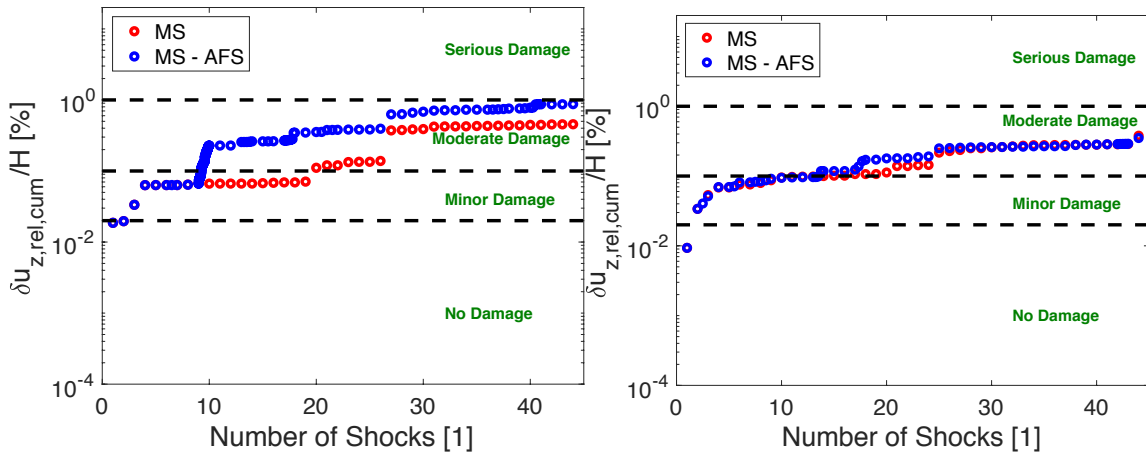


FIGURE 3. Comparaison du tassement relatif de la crête pour des séquence de MS et MS-AFS

A partir de la Figure 3, on peut identifier deux comportements différents. Pour l'exemple de la séquence dans la figure de gauche, on constate qu'après le 10^{ème} séisme, les répliques ont induis un tassement plus grand (courbe bleue) en comparaison avec le 10^{ème} séisme d'une séquence de MS uniquement (courbe rouge). Néanmoins, le remblai a pu récupérer au cours des années puisque vers la fin de la vie utile (après le séisme numéro 30), l'évolution du tassement pour les deux types de séquence étaient proche.

Concernant l'exemple de la séquence dans la Figure de droite, l'évolution du tassement cumulé pour cette séquence est le même si celle-ci était formé de MS ou de MS et AFS. Ce qui fait que dans certains cas, l'effet d'AFS peut être important puisqu'il contrôle le comportement du sol au cours du temps.

Avant de généraliser cette hypothèse, il est préférable de prendre en compte toutes les séquences calculées afin de voir l'évolution durant 100 ans. Pour cela, la valeur médiane du tassement relative de la crête pour les séquences de MS ou de MS-AFS est représentée dans la Figure 4. On voit bien sur la figure que l'évolution du dommage n'est pas similaire pour les deux types de séquence. La valeur du tassement relatif n'est pas la même au cours du temps. Par contre le niveau de dommage est, dans la plupart des cas, le même.

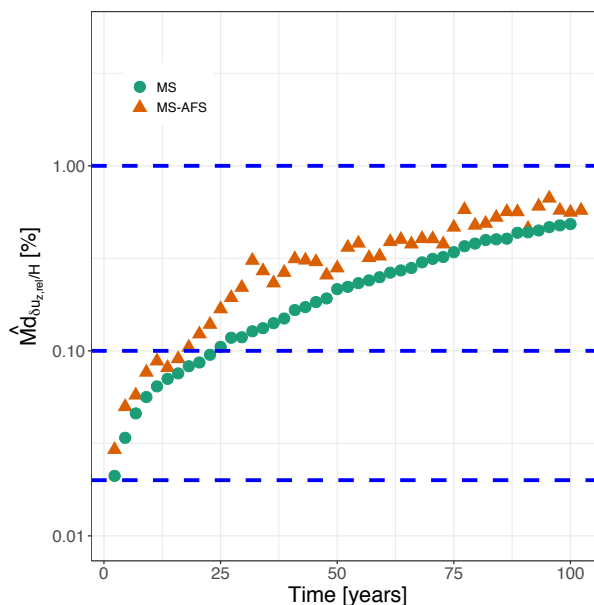


FIGURE 4. La valeur médiane du tassement relatif de la crête pour des séquences de MS et de MS-AFS

En conclusion de cette partie, la performance du remblai durant sa vie utile montre l'importance de l'histoire de chargement du sol et la densification du sol suite à des multiples chargements.

VI. PROBABILITÉ DE SURVIE

L'analyse de survie est le temps demandé pour qu'un évènement important ait lieu. Elle est représentée sous forme d'une fonction de survie qui estime la distribution temporelle d'un modèle donné. Cette fonction permet l'identification d'un paramètre nommé MTTF (Mean Time To Failure) qui est la durée moyenne pour avoir 50% de chance que ce modèle survive. Le calcul de cette fonction se fait sous une approche non-paramétrique suivant la méthode de Kaplan and Meir (1985). L'intérêt de cette méthode est qu'elle n'exige pas d'hypothèses a priori afin de trouver les distributions temporelles du modèle en question. Le travail de Khalil and Lopez-Caballero (2021) décrit la théorie de ce type d'analyse.

La section précédente a montré l'évolution du dommage du remblai suite à des séquences sismiques de types MS et MS-AFS. Dans cette partie, deux niveaux de dommages vont être étudié afin de calculer la probabilité de survie de ce remblai. Ces niveaux de dommages sont le niveau modéré et complexe, qui seront identifiés par DL3 et DL4 respectivement. La figure 5 montre la probabilité de survie de ces deux niveaux de dommages pour des séquences de type MS et MS-AFS. Trois idées importantes sont affichées sur cette figure : i) la MTTF, décrite dans le paragraphe précédent de cette section, ii) le *p-value* qui indique s'il y a une ressemblance statistique entre les deux courbes et iii) le tableau de risque qui montre le nombre de séquences qui n'ont pas atteint le niveau de dommage concerné.

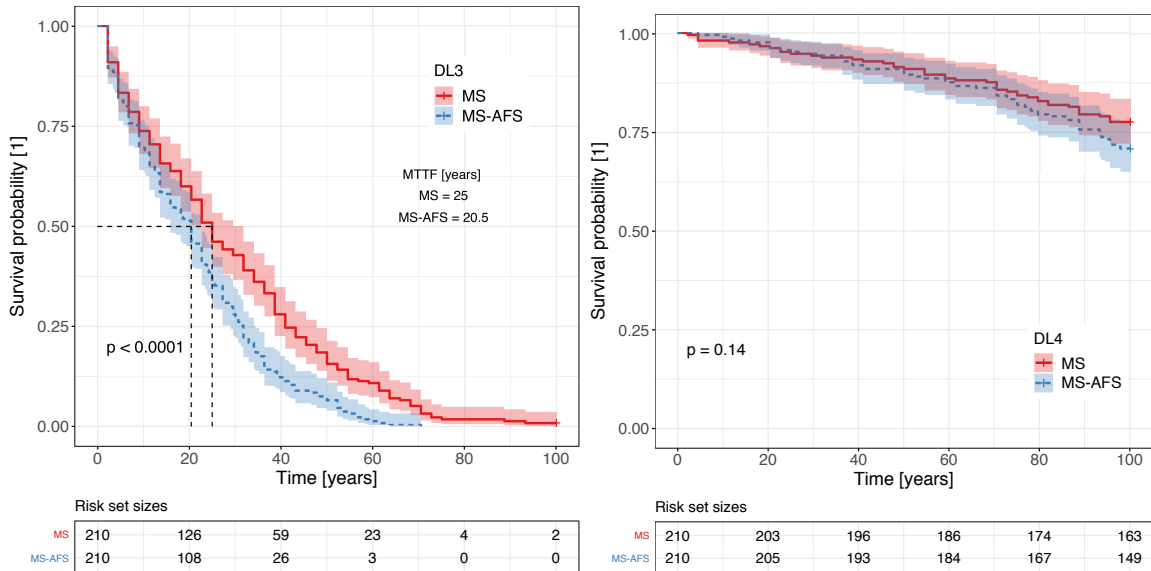


FIGURE 5. La fonction de survie des deux types de séquences pour le niveau de dommage modéré DL3 (figure de gauche) et complexe DL4 (figure de droite)

Pour le niveau de dommage modéré (DL3, figure de gauche), la MTTF a eu lieu durant la vie utile du remblai. Par contre la présence des AFS diminue la valeur de ce paramètre due à la densification du sol au cours du temps. En outre, le tableau de risque montre que toutes les séquences MS-AFS ont atteint le niveau DL3 au contraire de celles de type MS. Concernant la *p-value* de ce niveau de dommage, elle montre qu'il y a une différence entre les deux courbes puisque sa valeur est inférieure à 5%.

Pour le niveau de dommage DL4, il n'y a pas eu de valeur de MTTF. Ce qui montre que durant 100 ans, le remblai ne va pas atteindre DL4. En plus, la *p-value* est supérieure à 5%, ce qui fait que les deux courbes sont statistiquement proches.

En conclusion sur cette partie, la fonction de survie montre l'importance de prendre en compte les répliques puisque la performance du remblai dépend de leur occurrence.

VII. CONCLUSIONS

Ce papier présente l'évolution temporelle de la performance d'un remblai. La réponse aux questions qui ont été posées dans l'introduction sont les suivantes :

- Le dommage cumulé montre que les répliques affectent la performance du remblai puisque le dommage est plus élevé au cours du temps. En plus, l'histoire de chargement du sol et sa densification au cours du temps jouent un rôle important sur sa performance à long terme.
- L'analyse de survie du remblai montre que la considération des répliques est importante pour le niveau de dommage modéré puisqu'elle affecte la courbe de la fonction de survie.

REFERENCES

- Aristizàbal, C., Bard, P.-Y., Beauval, C., and Gómez, J. (2018). *Integration of site effects into probabilistic seismic hazard assessment (PSHA): A comparison between two fully probabilistic methods on the euroseistest site*. *Geosciences*, 8(8):285.
- Aubry, D., Hujeux, J.-C., Lassoudière, F., Meimon, Y. 1982. *A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour*, International Symposium of Numerical Modelling in Geomechanics, 3-13, Balkema
- Aubry, D. and Modaressi, A. (1996) *GEFDYN manuel scientifique*, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat, 1996.
- Hujeux, J.-C. (1985). *Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols*. In V. Davidovici (eds), *Génie Parasismique*, 278-302, Presses ENPC, France.
- Turcotte, D. L., Holliday, J. R., and Rundle, J. B. (2007). *BASS, an alternative to ETAS*. *Geophysical Research Letters*, 34(12):L12303.
- Kaplan, E. L. and Meier, P. (1958). *Nonparametric estimation from incomplete observations*. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282):457–481.
- Khalil, C. and Lopez-Caballero, F. (2021). *812 Survival analysis of a liquefiable embankment subjected to sequential earthquakes*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140:106436.
- Lopez-Caballero, F. and Khalil, C. (2018). *Vulnerability assessment for earthquake liquefaction-induced settlements of an embankment using gaussian processes*. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(2):04018010.
- Swaisgood, J. (2003). *Embankment dam deformations caused by earthquakes*. In PCEE 2003: 7th Pacific Conference on Earthquake Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, Conference Handbook, page Paper 014. New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A. (2012). *Simulation of orthogonal horizontal ground motion components for specified earthquake and site characteristics*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2):335–353.