

COMPRENDRE LES METHODES D'ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LIQUEFACTION DES SOLS

Muhsin Elie RAHHAL

Université Saint Joseph, Beyrouth, Liban, muhsin.rahah@fi.usj.edu.lb

RÉSUMÉ

Cet article présente une vue globale du contexte géologique et sismique du Liban, et en particulier de la grande ville de Beyrouth. L'étude s'intéresse notamment au risque de liquéfaction des sols dans quelques régions de la ville. Ce problème est d'autant plus important qu'il existe des dépôts granulaires non densifiés sur le littoral. Dans le but de contribuer à une meilleure compréhension des méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction, deux dépôts représentatifs sont analysés à l'aide de deux méthodes différentes. Ces deux méthodes sont basées sur l'approche de la contrainte cyclique: la première considère l'essai SPT et la deuxième l'essai CPT. Les facteurs de sécurité contre la liquéfaction sont comparés en termes de présence de particules fines et de résistance du sol.

ABSTRACT

This paper presents a global view of the geologic and seismic setting of Lebanon, and particularly of greater Beirut city. The study is especially concerned with the soil liquefaction risk in some areas of the city. The problem is very important since granular loose soil deposits exist along the coast. In the aim of contributing to better understand the liquefaction potential evaluation methods, two representative soil deposits are analyzed using two different methods. These two methods are based on the cyclic stress approach: the first one considers the SPT test and the second the CPT test. The calculated factors of safety against liquefaction are compared in terms of the presence of fine particles as well as the soil strength.

1. INTRODUCTION

Toute étude de microzonage sismique commence par une caractérisation de site basée sur l'identification des conditions géologiques régionales et locales de la zone étudiée. Il importe donc de reconnaître les formations tectoniques et géologiques. Les caractéristiques et les épaisseurs des unités géologiques ainsi que les conditions géotechniques du site sont déterminées à partir des forages et des tests in situ. Les bases des données géologiques et géotechniques sont essentielles pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction d'un site.

La grande région métropolitaine de Beyrouth a connu durant les quinze dernières années d'importants projets de développement urbain et de construction de divers bâtiments. Ces projets n'ont pu bénéficier d'une étude avancée de microzonage sismique. Des analyses de risque sismique pour le littoral libanais ont été réalisées, principalement pour la région du Grand Beyrouth qui regroupe la moitié de la population du pays soit au moins 2 millions d'habitants. La Figure 1 présente une vue aérienne du grand Beyrouth, où le port ainsi que les pistes de l'aéroport sont clairement identifiables. Des investigations géotechniques ont permis d'établir qu'il y a des zones comme le front de mer à Beyrouth constitué de remblais granulaires saturés et non densifiés. Il faut noter que la fonction publique (gouvernement, municipalités) ne s'est pas occupé convenablement du risque de liquéfaction, ajouté à cela la difficulté d'obtenir les données géotechniques auprès du secteur privé pour effectuer les analyses nécessaires.



Figure 1. Vue Aérienne du Grand Beyrouth.

L'importance de la présente étude est due à l'effet dévastateur qu'une liquéfaction des sols pourrait engendrer tant sur la population que sur le secteur économique vu la grande densité de population atteinte. Les Figures 2 et 3 présentent deux vues détaillées de la ville. Les zones remblayées au bord de la mer sont facilement discernables.

Cet article commence par faire un aperçu global du contexte sismique et géologique du Liban et du grand Beyrouth. Les dépôts de sol montrant un risque de liquéfaction sont présentés. Par la suite, les méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction sont discutées, et une étude de cas est analysée. L'évaluation de potentiel de liquéfaction de certains dépôts de sols représentatifs devrait fournir des lignes guides pour les projets dans l'avenir.



Figure 2. Vue du littoral avec le front de mer remblayé.



Figure 3. Vue du littoral près du centre ville.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET SISMIQUE DU LIBAN

L'Est de la Méditerranée est une zone sismique et le Liban a connu des événements sismiques majeurs. Le Liban occupe 230 km des 600 km constituant la côte Est de la Méditerranée à la frontière entre les plaques arabe et africaine. Cette région est sismiquement active via la grande faille de la mer morte qui regroupe l'activité sismique la plus importante de cette région de la méditerranée. La fracture de la mer morte a une longueur approximative de 1100 km et a une direction Nord-Sud. La figure 4 présente cette grande faille qui joint la mer rouge aux montagnes Taurus du sud de la Turquie. Cette faille coulissante est reconnue comme étant la fracture du Levant. Au Liban cette faille prend la direction NNE-SSO et diverge en cinq branches principales qui s'étendent dans les directions N-S et NNE-SSO. Ces cinq failles sont: Yammouneh, Roum, Hasbaya, Rachaya, et Serghaya. La figure 5 présente la configuration de ces failles. La faille de Yammouneh située à la bordure ouest de la vallée de la Bekaa est la principale faille coulissante active. La faille de Roum est indépendante de la faille qui traverse la ville de Beyrouth. De plus, une nouvelle étude sismotectonique (Elias *et al.* 2007) a révélé l'existence d'une faille de chevauchement en mer entre Saïda et Tripoli et d'une longueur de 150 km. Cette faille devient très proche de littoral nord (distance de 8 km). Le

séisme de magnitude de 7,5 (AD 551) pourrait être attribué à cette faille. La période de récurrence de ces grands séismes est estimée être entre 1500 et 1750 ans.

Le Liban a ainsi connu au moins quatre séismes de magnitude supérieure à 7 à travers l'histoire (AD551; AD1202; AD1759 et AD 1837). Dans les cinquante dernières années, cinq événements importants seront retenus: d'abord le double choc de mars 1956 qui a frappé le Liban avait son épicentre sur la limite nord de la faille de Roum et la magnitude était de 5,8. Le 3 juin 1983 un séisme de magnitude 5,3 était ressenti. Le 9 mars 1992 un séisme de magnitude 4 a produit une douzaine de petites secousses au nord du pays. Et enfin le 21 mars 1997 un séisme de magnitude 5,3 a frappé le pays avec pour épicentre encore une fois comme en 1956 la limite nord de la faille de Roum. Ce dernier séisme était ressenti à Beyrouth avec une intensité 6 sur l'échelle de Mercalli modifiée. Contrairement au séisme de 1956 qui laissa 136 morts et 20000 maisons détruites, le séisme de 1997 a produit moins de dommage et il n'y a pas eu de perte de vie humaine. Enfin, à l'heure de la préparation de ce travail, un séisme de Magnitude 5,1 a frappé le sud du Liban le 15 février 2008, et d'importants dégâts matériels ont été signalés dans le sud du pays, en particulier à côté de la ville historique de Tyr.

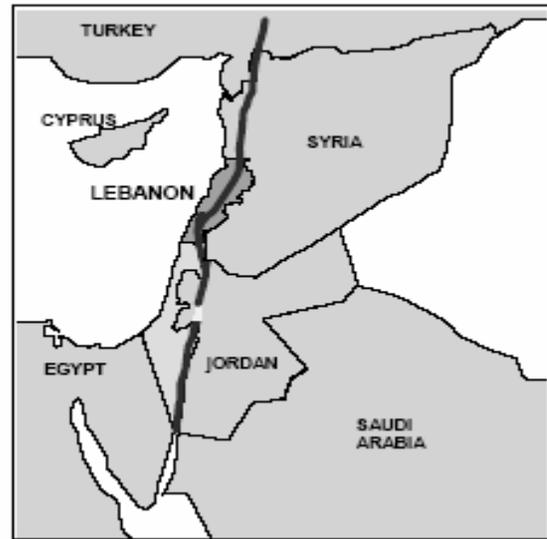


Figure 4. La grande faille du Levant qui relie le golfe d'Aqaba en Jordanie jusqu'au Sud de la Turquie en passant par le Liban.

Du point de vue géomorphologique, le Liban est formé de 2 chaînes de montagnes (le Mont Liban et l'Anti-Liban) séparées par la plaine de la Bekaa (Figure 5). Il y a aussi la plaine côtière qui sépare le Mont Liban de la méditerranée. Toutes ces formations s'étendent dans la direction NE-SO. Par ailleurs, les formations géologiques du Liban sont très variables. Il y a du basalte, des marnes, des dolomites, du

calcaire et du grès. Les dépôts de sol comprennent des sols granulaires lâches et denses, des argiles molles et très raides, du conglomérat et des alluvions. Dubertret (1955) a publié une étude exhaustive détaillant les différentes formations géologiques du Liban. Les plus anciennes formations datent de la période jurassique alors que les formations les plus jeunes appartiennent au quaternaire. Les cartes géologiques de Dubertret (1955) constituent toujours un document fondamental pour tout projet impliquant une cartographie. Dans le Grand Beyrouth les formations rocheuses suivantes sont identifiées: calcaire, calcaire dolomitique, calcaire clastique, calcaire oolitique, grès, calcaire et schiste, calcaire et schiste marneux. Ces formations ont des épaisseurs de 20m; en termes de propriétés mécaniques, un angle de frottement entre 25 et 33° et une cohésion allant de 30 à 300 kPa.

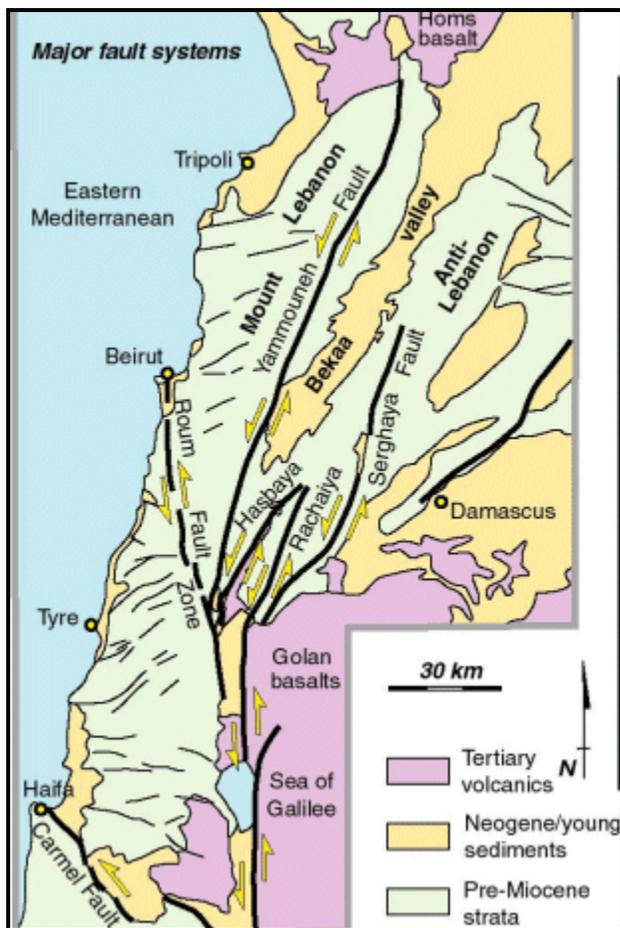


Figure 5. La Géomorphologie du Liban et la grande faille du Levant avec ses principales branches: Yammounneh, Roum, Hasbaya, Rachaya et Serghaya.

3. LES DEPOTS DE SOL PRESENTANT UN RISQUE DE LIQUEFACTION

La liquéfaction des sols est une cause principale des dommages qui surviennent durant les séismes. La

liquéfaction peut être schématisée comme la transformation d'un matériau granulaire saturé d'un état solide à un état liquéfié suite à une augmentation de la pression interstitielle et donc à une réduction de la contrainte effective.

Dans le Grand Beyrouth, il y a eu beaucoup de travaux de remblayage sur le littoral au nord de la ville ainsi que dans les alentours de la région du port. Ce remblai bien qu'ayant subi des travaux de densification in-situ n'a pas été analysé de manière avancée afin de connaître la propagation de cet effet de densification en fonction de la profondeur.

Des régions sableuses se retrouvent sur la plus grande partie du Grand Beyrouth. La nappe d'eau est très souvent proche de la surface du terrain naturel particulièrement près du littoral. On y retrouve surtout au centre et au sud de la ville jusqu'à l'aéroport des dépôts de sable rouge (terre rouge sableuse avec et sans galets) d'épaisseur considérable dépassant 15m. Il y a aussi des zones sableuses d'appellation géologique dune mouvante et présentes directement sur la côte. D'autres désignations se regroupent sous les noms suivants: Grès dunaire (Ramleh), sable alluvionnaire, sable jaune et les apports récents (remblais).

Toutes ces régions sableuses ont été investiguées via une campagne d'essais et de sondages. Des données provenant d'essais SPT et CPT ont rendu possible l'évaluation du potentiel de liquéfaction de ces sols. Des observations de terrain et une analyse des données de sondages ont aussi été menées afin de déterminer la susceptibilité des sols à la liquéfaction. Par exemple des valeurs de SPT faibles et un pourcentage de fines faible (< 12%) font de ce sol, un sol à risque.

Dans les études de microzonage réalisées à travers le monde, il est d'habitude de classer les sols vis-à-vis le phénomène de liquéfaction sous trois grands niveaux. Le premier niveau parle de susceptibilité à la liquéfaction: c'est une mesure de la résistance inhérente d'un sol au phénomène de liquéfaction. Cette susceptibilité est estimée en comparant les propriétés d'un certain sol à d'autres sols semblables où la liquéfaction a été établie. Les propriétés fondamentales de ces sols sont à cet égard, la granulométrie, le pourcentage de fines, la densité, la saturation et l'âge du dépôt. Le deuxième niveau est le potentiel de liquéfaction. Ce potentiel est la probabilité qu'un sol pourrait liquéfier. Ceci donc ne dépend pas seulement de la susceptibilité mais aussi de l'activité sismique de la région. Enfin, le troisième niveau porte sur les déplacements latéraux à la surface du sol. La magnitude des déplacements dépend des propriétés du sol, de la sismicité de la région et de la topographie.

Les régions de Beyrouth, où le sable et la nappe d'eau sont présents dans les 20 premiers mètres, sont considérées susceptibles à la liquéfaction. Une étude préliminaire (Sadek *et al.* 2004) avait tenté d'estimer le potentiel de liquéfaction des sols dans le Grand Beyrouth en se basant sur la méthode de Seed et Idriss (1971 et 1982). Le chargement sismique est comparé à la résistance à la liquéfaction exprimée en termes similaires. Quand le

chargement dépasse la résistance, la liquéfaction est supposée avoir lieu. Le chargement sismique est proportionnel à l'accélération maximale du séisme a_{max} . La résistance à la liquéfaction est déterminée en se basant sur les valeurs du SPT corrigé $(N_1)_{60}$ pour une Magnitude de séisme égale à 7,5; l'accélération a_{max} était égale à 0,2g mais pour certains cas où une amplification est possible a_{max} a atteint un maximum de 0,35g. Seuls les 20 premiers mètres ont été considérés dans le calcul. L'analyse des résultats a démontré que les sols au sud de Beyrouth jusqu'aux limites de l'aéroport sont susceptibles de liquéfier sous un séisme de magnitude 7,5. Le facteur de sécurité est inférieur à 1 pour une épaisseur de dépôt de 5 m. Dans ces régions du Sud de la ville, on retrouve notamment des dépôts de sable rouge, et d'autres dépôts granulaires saturés sur des épaisseurs de 20m.

Une autre analyse de risque géotechnique a été réalisée par Harb et Pico (2004) et Harb (2006). Une investigation du potentiel de liquéfaction du sable à travers le Grand Beyrouth a révélé que la liquéfaction pourrait avoir lieu dans le cas d'un séisme de magnitude moyenne à grande. Des études statistiques et déterministes ont été faites. Les accélérations les plus probables déterminées en fonction des sources pouvant influencer la région ont été estimées à 0,15g et 0,12g. La relation de l'accélération au site en fonction de la magnitude est développée à partir des relations d'atténuation utilisées pour la Jordanie (Malkawi et Fahmi, 1996). Pour le Liban, des relations d'atténuation n'existent pas. La région du Grand Beyrouth est considérée être à 20km de la source. Quand la magnitude est identifiée, la probabilité est obtenue en utilisant la relation de poisson pour événements sismiques espacés sur une période connue. Le remblai du front de mer est le secteur le plus dangereux car il suffirait d'une accélération de 0,04g pour liquéfier le sol. Un risque de liquéfaction dans cette zone à 80 % de probabilité pour une période de retour de 50 ans est estimé. Les sables rouges au sud de la ville pourraient liquéfier pour des accélérations entre 0,1 et 0,17g. Enfin le Centre Ville semble être moins susceptible car ce n'est qu'à partir d'une accélération de 0,3g que la liquéfaction pourrait avoir lieu.

En se basant sur les données géologiques et géotechniques disponibles et les études de liquéfaction des sols de la région du Grand Beyrouth, le présent article traite deux méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction en les appliquant particulièrement sur deux dépôts de sols granulaires représentatifs du littoral nord de la ville. La comparaison des résultats permet de comprendre le comportement du sol vis-à-vis du problème de liquéfaction et contribue à mettre au clair les similarités et les différences entre les deux méthodes de calcul.

4. ANALYSE DE CAS ET DISCUSSION

L'intérêt est porté à l'analyse de deux dépôts de sol du littoral nord de Beyrouth et à l'évaluation de la liquéfaction à partir des méthodes basées sur les essais in situ. L'accélération horizontale maximale induite par un séisme est considérée égale à 0,20g. Youd *et al.* (2001) présentent

une revue détaillée de toutes les méthodes d'estimation du potentiel de liquéfaction disponibles. Parmi les méthodes existantes pour évaluer ce potentiel de liquéfaction d'un sol, il y a d'abord la méthode à partir du SPT (Seed et Idriss, 1982; Seed *et al.* 1984; Seed *et al.* 1985; Seed et De Alba, 1986) qui sera appelée méthode Seed, puis aussi il y a la méthode de Robertson et Wride (1998) passant par l'analyse de données recueillies au CPT et la caractérisation du matériau in situ. Cette deuxième méthode sera indiquée dans cet article comme la méthode Robertson.

4.1 Méthodologie utilisée

L'approche répandue dans l'évaluation du potentiel de liquéfaction se base sur le principe de la contrainte cyclique. La conception de cette approche en contraintes cycliques est simple: le chargement sismique (CSR) exprimé en termes de contraintes de cisaillement cyclique est comparé à la résistance à la liquéfaction des sols (CRR) exprimée également en termes de contraintes de cisaillement cyclique (Seed *et al.* 2001; Youd *et al.* 2001). Aux endroits où le chargement excède la résistance, la liquéfaction est susceptible d'avoir lieu. L'application de l'approche en contraintes cycliques requière cependant une attention particulière quant à l'évaluation du chargement sismique et de la résistance à la liquéfaction du sol.

Une méthode reposant sur les résultats acquis au SPT, pour plusieurs sites où la liquéfaction est apparue, a été développée (Seed et Idriss, 1982; Seed *et al.* 1984; Seed *et al.* 1985; Seed et De Alba, 1986). La méthode Seed est donc une approche simple qui est basée sur des études de cas pour caractériser la résistance à la liquéfaction en fonction des tests in-situ. Cette méthode a été très étoffée, notamment suite aux séismes survenus à Loma Prieta en 1989 et à Kobe en 1995. Le problème de la méthode réside dans le fait que l'outil d'investigation est très peu précis par nature. En effet, de nombreux problèmes de frottement existent. Par ailleurs, le fait de remonter du matériau au carottier est intéressant mais nécessite la réalisation d'essais de laboratoire, ce qui peut être long et onéreux. La méthode Seed est basée sur une corrélation établie entre l'indice N (essais SPT) et la performance observée des dépôts de sable sous chargement sismique. La banque de données ainsi constituée a permis de déterminer un critère de liquéfaction en fonction de la nature du sol (plus exactement de sa teneur en fines), de sa résistance au SPT et de l'intensité de la sollicitation (CSR, Rapport de contraintes cycliques). Les points collectés sont utilisés pour déterminer une courbe référence pouvant donner le CRR (Rapport de résistance cyclique) pour un séisme de magnitude 7,5.

Pour les données provenant de l'essai CPT, Seed et De Alba (1986) avancent également une méthode en quatre étapes: normalisation du signal mesuré (la résistance de pointe q_c est normalisée selon les conditions de site), ajustement en fonction de la teneur en fines (par rapport à un sable propre), estimation du $CRR_{7.5}$ (Rapport de Résistance cyclique pour une magnitude de séisme égale à 7,5) et calcul du coefficient de sécurité pour la sollicitation

du projet. Par rapport à la méthode utilisée pour le SPT, le calcul du coefficient de sécurité est identique.

Afin réduire les incertitudes liées au SPT, la méthode de Robertson et Wride (1998) est une adaptation de la méthode Seed à un autre outil d'investigation qui est le CPT. L'avantage du CPT est que la précision du terme de pointe est bien plus grande (erreur maximale de l'ordre de 20%) puisque exempte de toute influence liée au frottement latéral. Par ailleurs, le CPT offre la possibilité d'obtenir une évaluation de la granulométrie grâce à son manchon de frottement qui se situe en amont de la pointe, le frottement au manchon étant directement lié à la granulométrie. La méthode proposée par Robertson et Wride (1998) permet d'en obtenir une estimation en fonction de q_c (résistance au cône CPT) et de f_s (frottement au manchon), paramètre non exploité par Seed et De Alba (1986). Dans leur démarche, Robertson et Wride (1998) utilisent un large éventail d'outils d'analyse développés spécifiquement pour le CPT, ce qui en fait l'une des méthodes les plus complètes aujourd'hui. Les aspects abordés par la méthode Robertson sont tout d'abord une correction de q_c pour les couches de faible épaisseur, une correction en fonction des conditions de site, et enfin une correction sur le type de sol traversé. Les conditions de site sont prises en compte par les pressions de confinement initiales effectives σ'_{vo} et totales σ_{vo} . Elles permettent le calcul de la résistance de pointe normalisée Q et la résistance au frottement normalisée F : Ces deux paramètres sont employés pour classer les sols; cette classification peut être traduite par un paramètre relatif au comportement du sol I_c . Enfin le pourcentage de fines régit les modifications à apporter au terme de résistance normalisée q_{c1N} .

Si le CSR est uniquement lié aux conditions de site, le CRR est un paramètre intrinsèque au sol. Les $CRR_{7.5}$ obtenus par les deux méthodes sont légèrement différents. On peut néanmoins émettre quelques hypothèses quant à une éventuelle justification de cette différence. Pour établir ces hypothèses, on cherche à déterminer les paramètres qui permettraient d'obtenir les $CRR_{7.5}$ selon les deux méthodes. Tout d'abord le $CRR_{7.5}$ (méthode Seed) dépend directement de $(N_1)_{60cs}$ qui comprend une correction pour la présence des particules fines, en d'autres termes il dépend de $(N_1)_{60}$ et F_c (la teneur en fines des échantillons). Tandis que le $CRR_{7.5}$ (méthode Robertson) dépend de (q_{1Ncs}) , de F_c et de f_s qui représente le frottement mesuré sur le manchon du CPT.

Les paramètres servant de base à l'étude sont: le CSR, le $CRR_{7.5}$, le SPT(N) et la résistance de pointe normalisée rapportée au comportement d'un sable propre équivalent $(q_{c1N})_{cs}$. La banque de données du CPT au LIBAN est rare tandis que celle du SPT est très reconnue et répandue, on a recours à estimer ou bien à trouver la valeur du CPT à partir des tests SPT. Des résultats de SPT et de CPT sont normalement comparés par un rapport de la résistance de bout de CPT, q_c , au nombre de coups de SPT, N ; en d'autres termes le rapport q_c/N qui dépend de la granulométrie. Globalement, les résultats fournis par la méthode Seed sont plus complets que par la méthode Robertson; cela peut être dû au fait que le calcul du facteur

de sécurité selon la méthode Seed est basé seulement sur N (SPT) c'est-à-dire quelque soit N il y aura un résultat; tandis que le calcul du facteur de sécurité selon la méthode Robertson est valable seulement pour l'équivalence de $N < 30$.

4.2 Résultats

Le premier dépôt de sol étudié dans ce travail se trouve dans le quartier de Dbayeh. Il a une profondeur de 10m. Il est formé d'une couche de 8m de sable moyen à grossier lâche et de gravier, et d'une couche de 2m de sable et gravier moyennement dense sous-jacente. Les valeurs de N sont 8 en surface et 20 en profondeur. La nappe d'eau se trouve à 1m sous la surface du terrain naturel.

L'analyse des résultats dans la Figure 6 montre que d'après la méthode Robertson, la liquéfaction aura lieu pour $a_{max}=0.2g$ à 6m et à 10m de profondeur. Tandis que d'après la méthode Seed (Figure 7), la liquéfaction commencera entre les profondeurs 4,5m et 7m, et à la profondeur 10m. Ceci permet de constater que le calcul du potentiel de liquéfaction d'après la méthode Seed est plus conservateur que celui d'après la méthode Robertson. En faisant une interprétation des résultats en fonction du pourcentage des fines F_c , il peut être déduit d'après la Figure 8, que le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson}/F_{Seed}$ est légèrement inférieur à 1 pour F_c compris entre 10 et 20 %, et il est supérieur à 1 pour F_c inférieur à 10%. Ce qui veut dire que le calcul de potentiel de liquéfaction d'après la méthode Seed est plus conservateur pour $F_c < 10\%$ et que les deux méthodes donnent presque le même résultat pour F_c compris entre 10% et 20%.

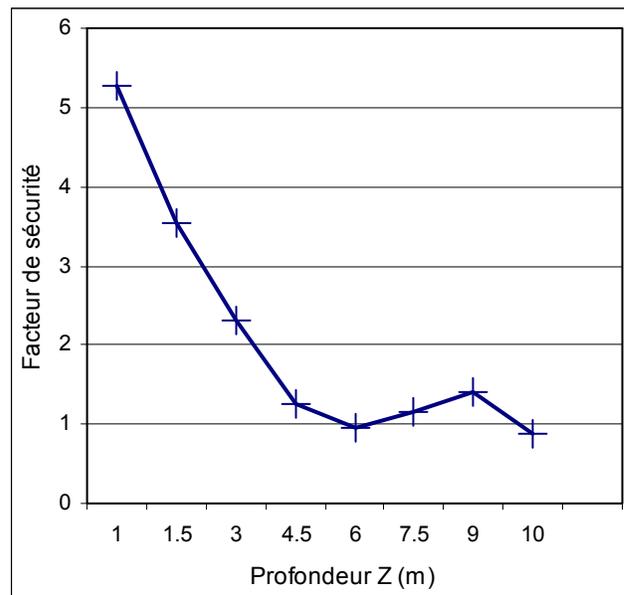


Figure 6. Évolution du facteur de sécurité en fonction de la profondeur suivant la méthode Robertson.

D'autre part on voit d'après la Figure 9, que le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson} / F_{Seed}$ est supérieur à 1 pour $(N_1)_{60cs}$ inférieur à 15 et il est légèrement inférieur à 1 pour $(N_1)_{60cs}$ supérieur à 15. Ce qui veut dire que le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson} / F_{Seed}$ d'après les deux méthodes tend vers 1 pour $(N_1)_{60cs}$ supérieur à 15.

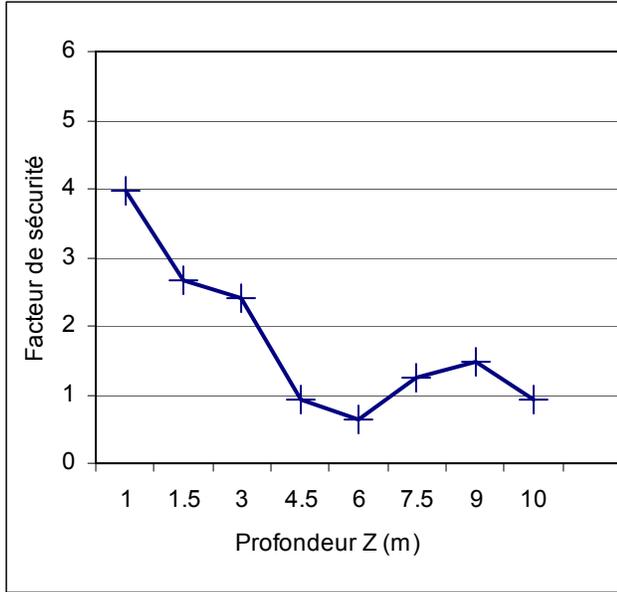


Figure 7. Évolution du facteur de sécurité en fonction de la profondeur suivant la méthode Seed.

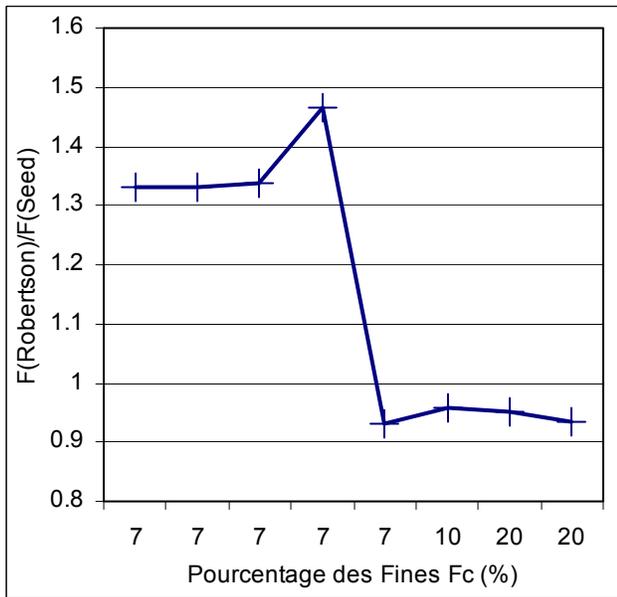


Figure 8. Le rapport des facteurs $F_{Robertson} / F_{Seed}$ en fonction de la teneur en fines.

Le deuxième dépôt de sol étudié se trouve dans le quartier de Zalka. Il a une profondeur de 20m. Les valeurs N du SPT sont fournies dans les parenthèses. Le dépôt est formé à la

surface d'une couche de 8m de sable moyen à grossier jaune brun et gravier peu dense (N= 9), puis d'une couche de 7m en argile silteuse et sableuse brune et gravier peu compact (N=30), puis d'une couche de sable fin jaune ocre de 4m (N=10), et enfin d'une couche de base marneuse (N>50). La nappe d'eau se trouve à 2m sous la surface. En examinant les résultats, il est à noter que les 2 méthodes Robertson (Figure 10) et Seed (Figure 11) montrent que la liquéfaction aura lieu pour $a_{max}=0,2g$ entre 9m et 10,5m de profondeur et à partir de 15m de profondeur.

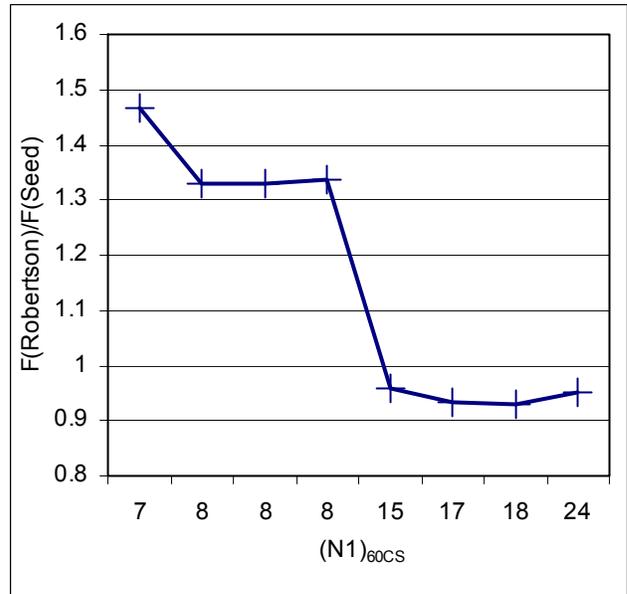


Figure 9. Le rapport des facteurs $F_{Robertson} / F_{Seed}$ en fonction de $(N_1)_{60cs}$.

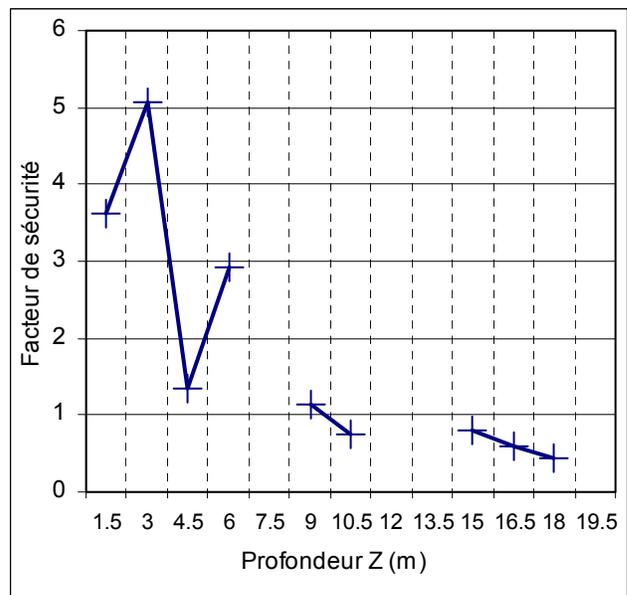


Figure 10. Évolution du facteur de sécurité en fonction de la profondeur suivant la méthode Robertson.

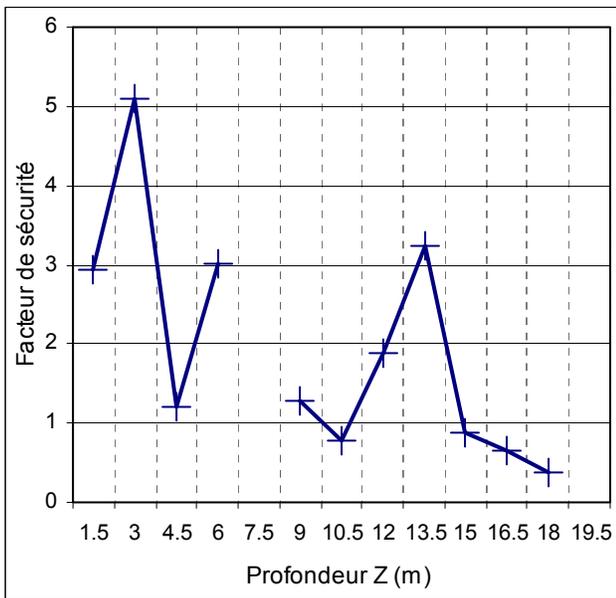


Figure 11. Évolution du facteur de sécurité en fonction de la profondeur suivant la méthode Seed.

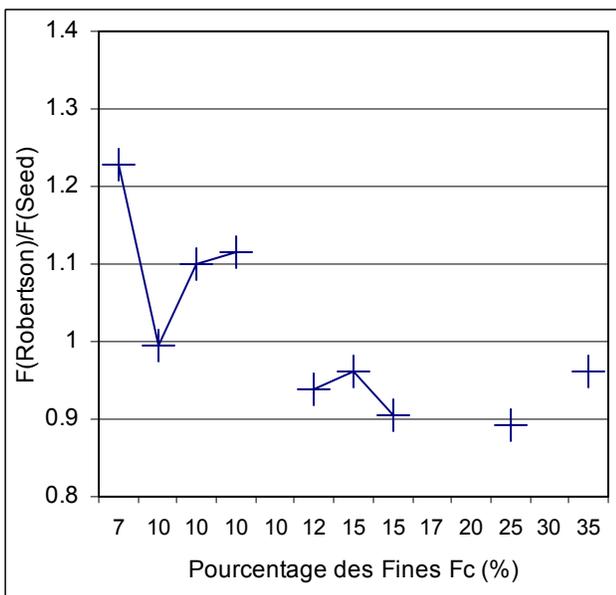


Figure 12. Le rapport des facteurs $F_{Robertson} / F_{Seed}$ en fonction de la teneur en fines.

Les résultats permettent de déduire que le calcul de potentiel de liquéfaction d'après les deux méthodes Robertson et Seed est le même. Aussi, d'après la Figure 12, le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson} / F_{Seed}$ est légèrement inférieur à 1 pour F_c compris entre 12 et 20 %, et il est supérieur à 1 pour F_c inférieur à 12%. Ce qui veut dire que le calcul de potentiel de liquéfaction d'après Seed est plus conservateur pour $F_c < 10\%$ et que les deux

méthodes donnent presque le même résultat pour F_c compris entre 12% et 20%. D'autre part la Figure 13 montre que le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson} / F_{Seed}$ est supérieur à 1 pour $(N_1)_{60cs}$ inférieur à 12 et il est légèrement inférieur à 1 pour $(N_1)_{60cs}$ supérieur à 12. Ce qui veut dire que le rapport des facteurs de sécurité $F_{Robertson} / F_{Seed}$ d'après deux méthodes tend vers 1 pour $(N_1)_{60cs}$ supérieur à 12.

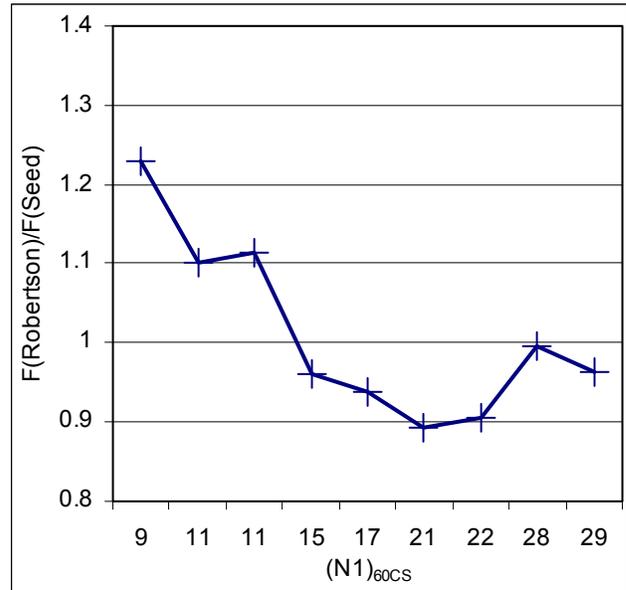


Figure 13. Le rapport des facteurs $F_{Robertson} / F_{Seed}$ en fonction de $(N_1)_{60cs}$.

Les résultats ainsi obtenus peuvent être interprétés en fonction de $(N_1)_{60cs}$ et F_c . Dans les résultats qui représentent $(F_{Robertson} / F_{Seed})$ en fonction de $(N_1)_{60cs}$, il est à noter que pour $(N_1)_{60cs} < 12$ le rapport $(F_{Robertson} / F_{Seed}) > 1,1$; ceci veut dire que l'évaluation du potentiel de liquéfaction est plus conservatrice selon la méthode Seed. Pour $12 < (N_1)_{60cs} < 30$, le rapport $(F_{Robertson} / F_{Seed})$ tend vers 1, ce qui permet de dire que l'évaluation du potentiel de liquéfaction mène à un résultat identique selon les 2 méthodes.

D'autre part, pour les résultats qui représentent $(F_{Robertson} / F_{Seed})$ en fonction de F_c , il est à noter que pour $10 < F_c < 20$ le rapport $(F_{Robertson} / F_{Seed})$ tend vers 1, ce qui veut dire que l'évaluation du potentiel de liquéfaction est presque le même selon les 2 méthodes. Pour $F_c < 10$ le rapport $(F_{Robertson} / F_{Seed}) > 1$, ce qui implique que l'évaluation du potentiel de liquéfaction est plus conservatrice selon la méthode Seed.

5. CONCLUSIONS

Après avoir exposé le contexte géologique et sismique au Liban, cet article a traité le problème de liquéfaction éventuelle des sols dans le Grand Beyrouth suite à un séisme de magnitude 7,5. Par la suite, une étude comparative de calcul du potentiel de liquéfaction de deux dépôts spécifiques a été réalisée en utilisant d'une part une méthode basée sur le SPT (méthode Seed) et d'autre part une méthode basée sur le CPT (méthode Robertson). L'analyse a montré de fortes similitudes des résultats entre les deux méthodes. Une interprétation en fonction du pourcentage des fines a été avancée. La méthode basée sur le SPT (Seed) fournit des résultats plutôt conservateurs en donnant des facteurs de sécurité plus faibles.

La littérature géotechnique qui traite les problèmes de liquéfaction affirme aujourd'hui que l'utilisation des essais in situ SPT et CPT a atteint un degré d'efficacité avancée dans l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols. Le présent article devrait contribuer quelque part à étoffer les données existantes de façon à enrichir les travaux des ingénieurs et des chercheurs. Enfin, sur un plan parallèle, un travail de recherche est entrepris actuellement par l'auteur sur le microzonage sismique de la ville de Beyrouth en collaboration avec d'autres chercheurs. Des résultats devraient être attendus très bientôt.

REMERCIEMENTS

L'auteur voudrait remercier les Professeurs Guy Lefebvre (Université de Sherbrooke) et Denis LeBoeuf (Université Laval) pour avoir eu l'amabilité d'être des évaluateurs du présent article.

REFERENCES

- Dubertret, L. 1955. Carte géologique du Liban au 200.000^E avec notice explicative. *Reprint with the financial help of the European Union*, Beirut, February 2000.
- Elias, A., Tapponier, P., Singh, S., King, G., Briaies, A., Daeron, M., Carton, H., Surssock, A., Jacques, E., Jomaa, R., and Klinger, Y. 2007. Active thrusting offshore Mount Lebanon: source of the tsunamigenic A.D. 551 Beirut-Tripoli earthquake. *The Geologic Society of America, Geology*, Vol. 35, no. 8, pp. 755-758.
- Harb, J. and Pico, L. 2004. Liquefaction risk assessment and implications on urban planning in the greater Beirut area. *Proc. of the fifth international conference on case histories in geotechnical engineering*, New York, USA, CD, 6p.
- Harb, J. 2006. Geotechnical risk with the urban expansion of the coastal metropole of greater Beirut. *Proc. of the first European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, CD, 11p.
- Malkawi, A.I.H. and Fahmi, K.J. 1996. Locally derived earthquake ground motion attenuation relations for Jordan and conterminous areas. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 29, no.4, pp. 309-319.
- Robertson, P.K. and Campanella, R.G. 1986. Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 111, no.3, pp. 384-403.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E. 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, no. 3, pp. 442-459.
- Sadek, S., Harajli, M. and Asbahan, R. 2004. A GIS-based framework for the evaluation of seismic geo-hazards in the greater Beirut area. *Proc. of the joint 11th International Conference in Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference in Earthquake Geotechnical Engineering*, Berkeley, USA, pp. 89-96.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, Vol. 97, no. SM9, pp. 1249-1273.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake Engineering Research Institute*, Berkeley, USA, 134p.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. 1984. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Earthquake Engineering Research Center*, Report no UCB/EERC-84/15 Berkeley, USA.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 111, no.12, pp. 1425-1445.
- Seed, H.B. and De Alba, P. 1986. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. *Proc., In Situ'86 Conference, ASCE*, pp. 281-302.
- Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., and Riemer, M.F. 2001. Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation. *Proc. 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California, USA, Paper no. SPL-2.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F. Jr., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F.III., Martin, G.R., Mitchell, J.H., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. and Stokoe, K.H.II. 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 127, no. 10, pp.817-833.