

Liquéfaction des sols sous vagues

Pascale Aussillous, Didier Collart & Olivier Pouliquen

IUSTI, Université de Provence, CNRS UMR 6595,
5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France
pascale.aussillous@polytech.univ-mrs.fr

Résumé :

Nous étudions expérimentalement le phénomène de liquéfaction des sols sous vagues. Nous utilisons un canal à houle dans lequel nous plaçons un fond sableux initialement lâche et mesurons la pression de pore à différentes profondeurs dans le sable lors du passage des vagues. Le signal de pression de pore moyen présente trois grandes phases d'évolution : une élévation rapide suivie d'une phase de pic ou de plateau puis d'une diminution progressive. Nous interprétons ces résultats par une liquéfaction rapide d'une partie du sol, suivie d'un front de sédimentation. Nous nous intéressons enfin au critère de liquéfaction ainsi qu'à l'épaisseur de sable liquéfiée, en tentant de mettre en évidence les nombres sans dimension pertinents.

Abstract :

We are studying experimentally soil liquefaction of a loose granular bed under a wave. We are measuring pore pressure at different level in the sediment. The signal shows three phases of evolution : a quick elevation then a peak or a flat zone and finally a slow decrease. We are interpreting these results as a quick liquefaction of a fraction of the granular bed followed by a sedimentation. Eventually we are focusing on a criteria for the onset of liquefaction as well as the thickness of the liquefied zone.

Mots-clefs :

milieux granulaires ; mécanique des fluides

1 Introduction

Le gradient de pression généré par le passage d'une vague au-dessus d'un milieu granulaire lâche entraîne la compaction de ce milieu. Cependant, cette compaction se fait en passant par un état transitoire dans lequel l'eau s'échappant du sol met en suspension les grains. Dans cet état transitoire, le sol se comporte comme un liquide : on peut voir un objet s'enfoncer progressivement lors du passage des vagues. On parle alors de "liquéfaction des sols". Sous vagues, ce phénomène peut jouer un rôle important dans la stabilité des structures sous marines (récifs artificiels, pipe-lines (Sumer et al (1999)), enrochements côtiers, mines...) ou celle de pentes qui en se déstabilisant peuvent générer des avalanches sous-marines.

Dans un premier temps, nous présentons l'état des connaissances sur le phénomène de liquéfaction puis l'expérience développée. Enfin nous discutons les résultats obtenus et développons un modèle pour prédire les conditions de liquéfaction et l'épaisseur de sable liquéfiée.

2 Etat des connaissances

2.1 Processus de liquéfaction sous vagues

Au niveau du sol, la houle se caractérise par deux effets physiques principaux. Le premier est la génération d'une contrainte de cisaillement cyclique à proximité de la surface, responsable

du phénomène d'enfouissement. Le deuxième effet, qui va conditionner l'apparition éventuelle de phénomènes de liquéfaction est une variation cyclique de la pression. On peut séparer le processus global de liquéfaction en trois grandes phases (figure 1) :

- Arrangement initial peu compacté. La pression interstitielle ou pression de pore à l'intérieur du sol est la pression hydrostatique. Le poids des grains est porté par le squelette granulaire.
- Liquéfaction-consolidation : sous l'effet des vagues, les grains bougent et sont déstabilisés. Durant une période transitoire, les grains sont portés par le fluide ce qui provoque une augmentation de la pression de pore. Puis l'excès de pression interstitielle diminue progressivement.
- Arrangement final : les grains sont à nouveau en contact mais dans un réseau plus compact. La pression de pore est hydrostatique et le poids des grains est repris par le squelette granulaire.

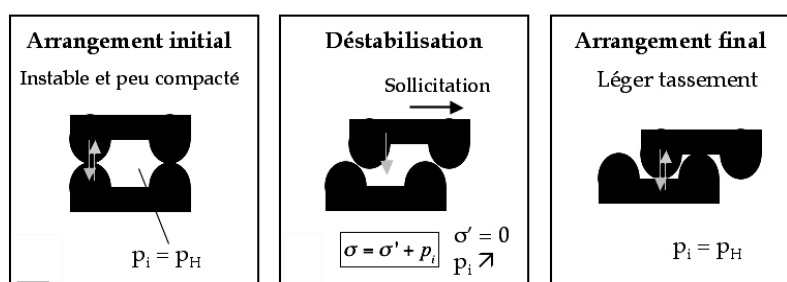


FIG. 1 – Schéma du comportement des grains au cours du processus de liquéfaction.

Pour décrire le couplage fluide-milieu granulaire, on décompose la contrainte totale en deux termes, la pression de pore p_i et la contrainte granulaire ou effective σ' (Terzaghi (1943)) :

$$\sigma = \sigma' + p_i \quad (1)$$

Pendant la liquéfaction, la contrainte granulaire chute et la pression de pore augmente : les contacts sont rompus. La mesure des variations de pression de pore dans le milieu granulaire permet donc l'étude du phénomène de liquéfaction.

2.2 Modèles physiques

Dans la littérature, on trouve principalement trois types de modèles physiques pour représenter le comportement en volume d'un sédiment soumis à l'action des vagues :

- Le modèle le plus employé est celui de la poro-élasticité (Mei (1989), Yamamoto et al. (1978)) : le sédiment est modélisé comme un poreux déformable élastique.
- Le modèle à deux couches fluides (Dalrymple et al. (1978)) représente le milieu granulaire comme un fluide visqueux et considère la propagation d'une onde linéaire à l'intérieur d'un système fluide à deux couches visqueuses.
- Le modèle de liquéfaction-consolidation progressive (Miyamoto et al. (2004)) sépare le milieu en une zone supérieure fluide comportant deux couches visqueuses (fluide et sol liquéfié) et une zone inférieure de sol élasto-plastique. Ces deux zones sont séparées par un front de solidification qui progresse vers le haut au cours du processus de consolidation.

3 Expérience

3.1 Montage expérimental

Un canal à houle (6,6 m x 0,59 m x 18 cm) de l'équipe IOA du laboratoire IRPHE a été utilisé dans le cadre de cette étude. La hauteur d'eau (h_e) a été imposée à 7, 10 ou 14 cm. Les vagues produites ont des longueurs d'onde (λ) comprises entre 0,3 et 2 m, une amplitude (A) entre 0,4 à 1,8 cm pour des fréquences imposées entre 0,5 et 3 Hz. Un bac à sédiment (1 m x 58 cm x 7 cm) pouvant accueillir une épaisseur de 7 cm de sédiment a été monté sur le canal (figure 2). La hauteur de sable au centre (h_s) a été fixée à 6,6 cm.

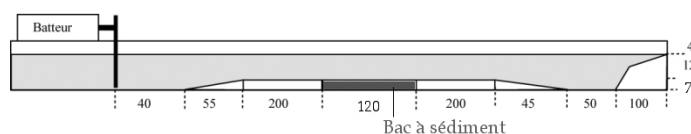


FIG. 2 – Schéma du canal à houle (les unités de longueur sont en cm).

La mesure de la pression de pore à l'intérieur du sédiment est faite grâce à 7 capteurs ultra basse pression de type piézo-électrique (DCAL405DN / DC005NDC4) dont la gamme de mesure s'étend entre 0 et 1245 Pa. Les 7 capteurs permettent une mesure simultanée de la pression à des profondeurs différentes à l'intérieur du sédiment. Deux sondes capacitatives, une en amont et l'autre en aval du bac à sédiment, donnent l'amplitude, la longueur d'onde et la position des vagues. Enfin, le mouvement de la surface libre du sédiment est mesurée en filmant la position de l'intersection d'une nappe laser en incidence rasante avec la surface du sédiment.

3.2 Milieu granulaire utilisé et conditions initiales

Le milieu granulaire est constitué à partir de microbilles de verre (Vacubilles / USF), de densité $\rho = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$, dont le diamètre est compris entre 45 et 90 μm . Le milieu granulaire est d'abord mis en suspension puis laissé sédimenté par gravité pendant 3 minutes avant d'imposer les vagues.

4 Résultats et discussion

4.1 Pression de pore

La figure 3a représente l'évolution de la surpression (par rapport à l'hydrostatique) mesurée dans le sédiment à deux profondeurs différentes dans des conditions typiques pour lesquelles un phénomène de liquéfaction est observé. A l'état initial la pression de pore dans le sol est hydrostatique et la surpression est nulle. Dès que les premières vagues arrivent au-dessus du milieu granulaire, on observe 3 grandes phases d'évolution du signal de pression de pore :

- Une élévation rapide de la pression moyenne.
 - Une phase de pic ou de plateau. Durant cette phase, les fluctuations de pression sont plus importantes que dans les autres phases. La pression moyenne du plateau est d'autant plus faible que le capteur est proche de la surface du sédiment.
 - Une diminution progressive de la pression moyenne qui rejoint finalement sa valeur initiale.
- On note que les courbes de pression de pore sont superposées dans cette phase.

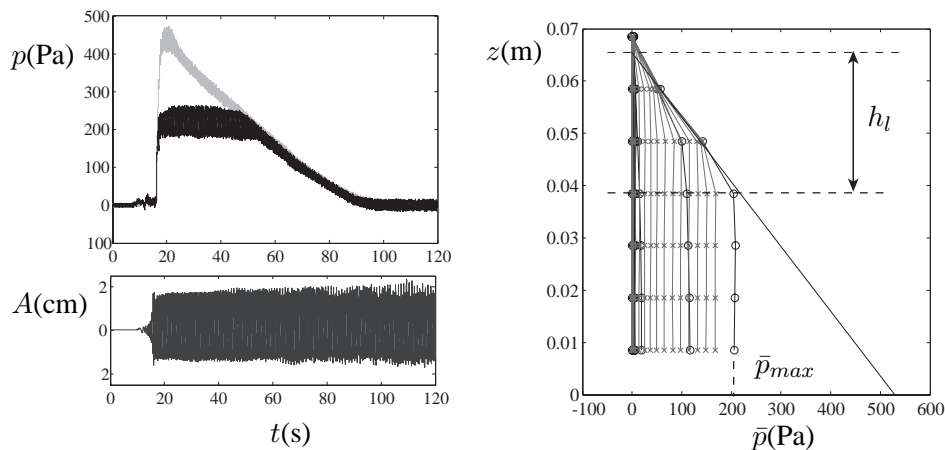


FIG. 3 – Evolution de la pression de pore a) Pressions mesurées à 0,8 cm (gris) et 4,8 cm (noir) du fond et amplitude de la vague en fonction du temps ($h_e = 10$ cm, $f = 2$ Hz, $\lambda = 39$ cm, $A = 1.5$ cm). b) Profil de pression moyenne à différent temps (mesures toutes les 2.5 s, $h_e = 7$ cm, $f = 2.5$ Hz, $\lambda = 22$ cm, $A = 0.85$ cm). Le temps augmente d'abord de gauche à droite (\circ : période de liquéfaction) puis de droite à gauche (\times : période de consolidation). La courbe en trait plein correspond au poids déjaugé des grains avec une fraction solide $\phi = 0.55$. La pression maximale atteinte (\bar{p}_{max}) ainsi que la hauteur maximale de la zone liquéfiée (h_l) sont représentés.

La figure 3b représente les profils de pression moyenne (\bar{p}) au sein du milieu granulaire pour différents temps. Les courbes présentent deux parties à un temps donné :

- En haut, le gradient de pression est constant et égal au poids déjaugé des grains.
- En bas, la pression est constante. Cette zone croît au cours de l'expérience, au détriment de la partie supérieure qui finit par disparaître. La surpression moyenne redevient alors nulle sur toute la longueur du profil.

On peut également extraire les profils de fluctuation de pression (\tilde{p}). Leur examen montre que la zone supérieure présente un amortissement très faible contrairement à la zone inférieure.

4.2 Interprétation et proposition d'un scénario

L'ensemble des résultats présentés ci-dessus suggère un scénario de liquéfaction relativement simple. Dès les premières vagues le milieu semble très vite se déstabiliser sur une couche épaisse. Les profils de surpression moyenne juste après les premières vagues sont linéaires et le gradient est compatible avec le poids des grains déjaugés. On peut en déduire que cette déstabilisation initiale donne lieu à une remise en suspension complète des grains dans cette couche.

L'évolution des profils de surpression moyenne et des fluctuations de la pression moyenne laisse penser qu'il existe un front de sédimentation qui progresse de bas en haut dès que la liquéfaction de la couche sédimentaire a commencé à se développer. A la fin du cycle, la zone liquéfiée a disparu et le sédiment est consolidé. Le front séparant la zone solidifiée de la zone encore en suspension semble progresser à vitesse constante.

4.3 Effet de seuil

Afin de d'étudier les mécanismes déclencheurs de la liquéfaction, nous avons modélisé les fluctuations de pression induites par le passage des vagues sur le milieu granulaire.

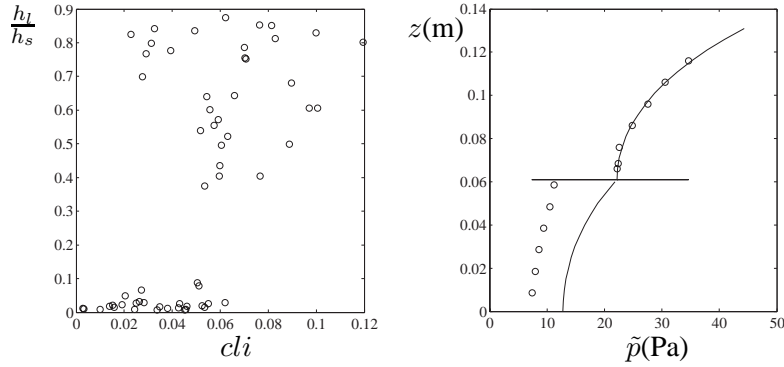


FIG. 4 – a) Evolution de h_l/h_s en fonction du nombre sans dimensions Cli , pour les expériences réalisées. b) Profil des fluctuations de pression une fois la liquéfaction terminée ($h_e = 7$ cm, $f = 2$ Hz, $\lambda = 33$ cm, $A = 0.6$ cm). Comparaison avec le modèle donné par les équations 2 et 3 en trait plein.

Pour la partie fluide, nous utilisons un modèle de houle potentielle avec comme condition un fond rigide. Ce modèle permet d'obtenir la pression sur le fond (équation 2).

$$P = P_{atm} + \rho g h_s + \frac{\rho A g}{ch(kh_e)} \cos(kx - wt) \quad (2)$$

Où g est l'accélération de la gravité, $k = 2\pi/\lambda$ et $\omega = 2\pi f$ sont le nombre d'onde et la pulsation de la vague. On considère ensuite le sédiment comme un simple poreux, et on utilise la pression à la surface pour calculer, à l'aide de la loi de Darcy, la pression dans le poreux (équation 3).

$$P = P_{atm} + \rho g z + \frac{\rho A g}{ch(kh_{eau})ch(kh_s)} ch(kz) \cos(kx - wt) \quad (3)$$

Le gradient de pression étant le moteur de l'instabilité, nous avons défini le nombre sans dimension Cli (critère de liquéfaction immédiate) qui compare le gradient de pression vertical maximum induit dans le poreux par les vagues au poids des grains déjaugé (équation 4).

$$Cli = \frac{\rho A k t h(kh_s)}{\phi \Delta \rho c h(kh_{eau})} \quad (4)$$

Le cas $Cli > 1$ correspond à la liquéfaction immédiate. Pour caractériser le niveau de liquéfaction, on mesure l'épaisseur maximale de la zone liquéfiée (h_l) en relevant la pression maximale atteinte (\tilde{p}_{max}) et en supposant que la couche liquéfiée est en suspension (figure 3b). Cette mesure est normalisée par l'épaisseur de sable. Quand $h_l = h_s$ tout le sable est liquéfié.

Sur la figure 4, les points $h_l/h_s = f(Cli)$ ont été tracés pour toutes les expériences réalisées. Cette figure montre qu'il existe une valeur seuil de Cli pour laquelle la liquéfaction apparaît assez brutalement. Ce seuil est d'ordre 0.05 soit bien inférieur au seuil de liquéfaction immédiate. Cependant les points sont très dispersés. De plus, si l'on compare le profil des fluctuations de pression une fois la liquéfaction terminée avec le modèle donné par les équations 2 et 3 (figure 4), on note un saut de fluctuation de pression à la traversée de l'interface qui n'est pas prévu par l'équation 3. Cet effet pourrait expliquer le fait que le nombre Cli tel qu'il est calculé ne prédise pas correctement le seuil de liquéfaction.

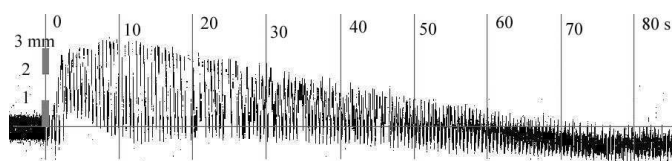


FIG. 5 – Position de la surface du sable en fonction du temps.

4.4 Dilatation-tassement du sédiment

L'observation des déformations de la surface du sédiment à l'aide de la nappe laser permet d'étudier la compaction associée au phénomène de liquéfaction. La figure 5 montre l'évolution temporelle de la position de la surface du sédiment. Dès que les premières vagues arrivent, on peut voir des ondes de fréquence semblable à celle de la surface libre se propager à la surface du sédiment. Le milieu granulaire commence par se dilater (+1,5 mm) puis on observe une compaction progressive. En fin de liquéfaction la surface du sédiment est de nouveau rigide et ne présente plus d'ondulations. Le milieu granulaire s'est finalement compacté de 2 % (-1 mm) par rapport à l'état initial. On peut conclure de ces observations que durant la liquéfaction, le sédiment se comporte comme un fluide et se déforme en suivant les vagues.

5 Conclusion

Des mesures systématiques de pression interstitielle dans un milieu granulaire sous vagues ont permis de mettre à jour un scénario de liquéfaction. Un paramètre sans dimension qui contrôle l'apparition du phénomène a été identifié. Ce paramètre est le gradient de pression maximum imposé par la vague, adimensionné par le poids des grains. Lorsque le seuil est dépassé, une couche de sable d'épaisseur finie est déstabilisée, mis en suspension et produit ainsi une surpression. La consolidation débute juste après que le niveau de pression interstitielle ait atteint sa valeur maximale dans le sédiment. Les grains se redéposent alors progressivement à partir de la zone la plus profonde liquéfiée, définissant ainsi un front de consolidation mobile.

Références

- Dalrymple, R.A. and Liu, P.L.F. 1978 Waves over soft muds : a two-layer fluid model. *Journal of Physical Oceanography* **8** 1121-1130
- Mei, C.C. 1989 Wave-induced stresses in a poro-elastic seabed. In *The applied dynamics of ocean surface waves. Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons.* 673-705
- Miyamoto, J., Sassa, S. and Sekigushi, H. 2004 Progressive liquefaction of a sand layer during continued wave loading. *Géotechnique* **54** 617-629
- Sumer, B.M., Fredse, J., Christensen, S. and Lind, M.T. 1999 Sinking/Floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves. *Coastal Engineering* **38** 53-90
- Terzaghi, K. 1943 Theoretical soil mechanics. *New-York, Wiley* 1-510
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeiher, H. and Van Hijum, E.V. 1978 On the response of a poro-elastic bed to water waves. *J. Fluid Mech.* **87** 331-376