



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Instabilité mécanique des sols saturés prélevés dans le littoral d'Oran, Algérie

Mechanical instability of saturated soils sampled in the Oran coast, Algeria.

Mohammed Bousmaha^a, Mohamed Bensoula^b, Renaud Toussaint^c

^aUniversité des sciences et de la technologie Mohammed Boudiaf, Oran, Algérie.

^bUniversité Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie.

^cInstitut de Physique du Globe de Strasbourg, CNRS, Université de Strasbourg, France.

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 18 septembre 2019

Révisé : 31 octobre 2019

Accépté : 10 novembre 2019

Mots clés:

Liquéfaction

Pression interstitielle

Oscillations horizontales

Accélération imposée

Keywords :

Liquefaction

Pore pressure

Horizontal oscillation

Imposed acceleration

RESUME

La liquéfaction est un risque naturel important associé aux séismes. Certains de ses effets dévastateurs incluent le basculement et le naufrage des bâtiments et des ponts, ainsi que la destruction des pipelines. L'ingénierie géotechnique conventionnelle suppose que la liquéfaction se produit via une pression interstitielle élevée. Nous montrons, en utilisant des simulations et des expériences, un autre mécanisme de liquéfaction dans des sols sableux saturés, sans pression de fluide interstitielle élevée. L'objectif de ce travail, est de suivre et de caractériser le déplacement vertical d'un intrus sur une masse de sol saturée lors d'expériences en laboratoire. A partir des résultats, Il a été démontré que la liquéfaction a un impact direct sur le déplacement vertical de l'intrus. On peut en conclure que le mouvement de l'intrus dépend essentiellement de l'accélération imposée et de la densité relative du sol.

ABSTRACT

Soil liquefaction is a significant natural hazard associated with earthquakes. Some of its devastating effects include tilting and sinking of buildings and bridges, and destruction of pipelines. Conventional geotechnical engineering assumes liquefaction occurs via elevated pore pressure. We show, using simulations and experiments, another mechanism for liquefaction in saturated sandy soils, without high pore fluid pressure. In this work, the objective is to follow and characterize the vertical displacement of an intruder on a saturated mass of soil in laboratory experiments. The liquefaction is shown to have a direct impact on the vertical displacement of intruders. It can be concluded that the movement of the intruder depends essentially on the imposed acceleration and the relative density of soil.

* Corresponding author. Tel.: +213 661856866.

E-mail address: mohammed.bousmaha@univ-usto.dz

1 Introduction

La liquéfaction est l'un des sujets de recherche les plus importants dans le domaine de la géotechnique. Les ouvrages de génie civil construits en milieu marin ou dans le littoral, tels que les digues en caisson, les plates-formes offshore, les blocs de construction au quai des terminaux portuaires et les piliers de ponts, ainsi que le sol sous leurs fondations sont un défi de taille pour les ingénieurs [1, 2].

La stabilité et la fonctionnalité des équipements dépendent fortement des propriétés géo-mécaniques des sols situés dans la zone de prélèvement, ainsi que des charges externes. Durant un chargement monotones ou cycliques, la pression interstitielle de l'eau accumulée autour et sous de telles structures peut sérieusement affecter le processus associé à l'instabilité de la construction ou à la défaillance de sa fondation. Les deux principaux modes de défaillance rencontrés lors de l'accumulation de la pression interstitielle sont les défaillances de surface par glissement ou les défaillances par tassement excessif. Si l'accumulation de pression d'eau dans les pores entraîne le phénomène de liquéfaction, il en résultera une défaillance ou une instabilité directe de la structure [3-5].

Une étude mécanique des sols sujets à la liquéfaction revêt une importance capitale pour la conception des ouvrages de génie civil [6-8]. Les caractéristiques du sol et l'amplitude de la fréquence des vibrations sont des facteurs importants pour contrôler l'instabilité mécanique ainsi que le déplacement important en masse de sol moins de cohésion [9, 10]. Ces facteurs peuvent être les conditions permettant de prédire le comportement de liquéfaction ou de dilatation afin d'éviter de tels risques d'instabilité de milieu poreux se manifestant par des défaillances ou des déplacements de masse importants. La détermination précise des conditions critiques a constitué un défi majeur pour les ingénieurs géotechniciens [11, 12].

Les sols sableux saturés sont vulnérables à la liquéfaction et peuvent perdre une partie de leur résistance au cisaillement lors du chargement statique ou vibratoire. Cela pourrait s'expliquer par une augmentation de la pression de l'eau interstitielle dans les pores, et donc par une diminution de la contrainte effective (une diminution de la résistance du squelette du sol). En milieu marin sablonneux, la liquéfaction se produit à la surface du lit, puis s'étend rapidement sur la profondeur du sol jusqu'à la couche imperméable, ce qui permet au sol de se comporter comme un liquide. Elle est causée par les tremblements de terre ayant fait l'objet de nombreuses études au cours des vingt dernières années. Cependant, jusqu'à récemment, l'impact de la liquéfaction résultant de l'excitation vibratoire du sol était mal connu [13]. En effet, ce phénomène n'a pas été suffisamment abordé dans la littérature, en dépit des nombreux progrès réalisés dans les structures marines mais pas dans la conception de leurs fondations liées aux phénomènes de liquéfaction des sols [14]. Plusieurs défaillances du flux de liquéfaction peuvent généralement être déclenchées par des chargements statiques ou dynamiques.

Le processus de liquéfaction des sols sableux est largement étudié, plusieurs facteurs affectant les phénomènes ont été étudiés. L'influence de ces facteurs est associée au comportement résiduel en résistance au cisaillement et à la dilatation. Les résultats obtenus des recherches précédentes sont quelque peu controversés. Bien que de nombreuses connaissances sur la stabilité des roches aient été acquises au fil des ans, peu de recherches ont été menées lorsque les structures sont soumises au mouvement cyclique du sol liquéfié.

Cet article a pour objectif d'analyser la liquéfaction vibratoire induite par le lit d'eau autour des structures marines côtières, en mettant l'accent sur la liquéfaction résiduelle, la stabilité des équipements enterrés tels que les pipelines dans les sols liquéfiés.

Le présent travail de recherche porte sur des essais expérimentaux de secousses contrôlées sur des sols sableux de densités relatives différentes vis-à-vis de la vulnérabilité à l'instabilité mécanique et sur l'analyse de leur comportement mécanique. Les expériences au laboratoire de l'équipe de géophysique expérimentale à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ont été effectuées sur un sol naturel extrait de la région d'Oran en Algérie, située proche de la plaque tectonique afro-européenne connue pour son activité sismique intense.

L'objectif principal est d'analyser expérimentalement le comportement mécanique dans des conditions vibratoires contrôlées d'échantillons saturés reconstitués lâches en conditions dynamiques, de solliciter l'échantillon de sable avec une fréquence de secousse et une amplitude des oscillations constantes [15, 16]. Les résultats obtenus visent à décrire le déplacement d'un intrus au sommet d'un bac à sable sous différentes propriétés du sol telles que l'état de densité, ainsi que l'amplitude et l'intensité de la vibration [17-20].

2 Essais et procédure

2.1 Dispositif expérimental

2.1.1 Caractéristiques du sol

Le sol est extrait de la région côtière de la ville d'Oran, située au nord-ouest de l'Algérie ($35^{\circ} 42'25.16'' \text{N } 0^{\circ} 38'28.82'' \text{W}$), au bord de la mer Méditerranée. Une telle région est connue par une activité sismique. Des échantillons de sol sont prélevés sur la côte d'Oran où de nombreuses infrastructures côtières sont en cours de développement. Le sol en place est principalement composé de particules de sable avec un très faible indice de plasticité.

En particulier, des infrastructures lourdes sont en cours de développement dans la région. Il est important de connaître le comportement de liquéfaction du sol pour assurer la stabilité à long terme. L'objectif est de soumettre le sable saturé à l'état lâche sous une série de tests de vibrations constantes.

Une série d'essais de laboratoire standard ont été effectués sur des échantillons de sol extrait afin de déterminer ses caractéristiques géotechniques avant les expériences de chargement. Dans cette partie de l'étude, la courbe granulométrique est illustrée dans la figure 1. Selon la classification ASTM D2487-11 (2011), l'échantillon est constitué de sable et de grade (SP).

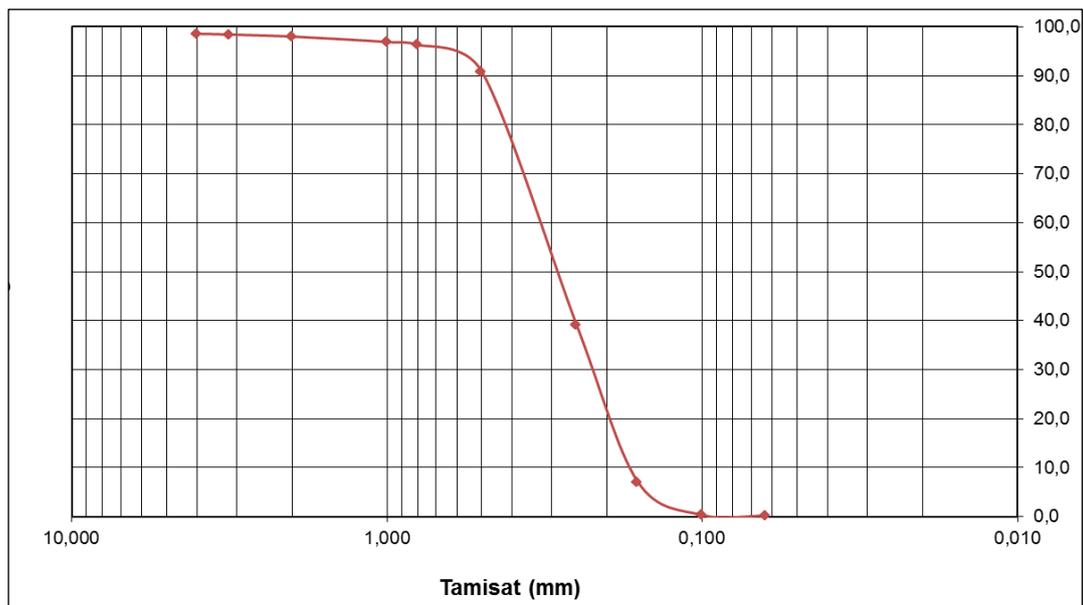


Fig. 1 Courbe granulométrique du matériau testé.

À partir des résultats de caractérisation [21], les résultats des propriétés du sol sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés géotechniques des échantillons de sol

	G_s	e_{min}	e_{max}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c
Sable	2,663	0,672	0,967	0,172	0,245	0,343	1,994	1,017

Avec :

G_s : Densité de la matière solide,

e_{min} : Indice des vides minimum (correspondant à un d'état dense),

e_{max} : Indice des vides maximal (état de densité lâche),

D_i : Diamètre des grains correspond à $i\%$ de tamisât,

C_u : Coefficient d'uniformité,

C_c : Coefficient de courbure.

Il est possible de voir sur la figure 2 que les grains de sable du sol ont une forme angulaire avec un diamètre compris entre 100 et 500 μm et que la longueur peut atteindre les 2000 μm , l'équipement utilisé pour l'analyse d'image est un microscope de marque KEYENCE VHX-S550E.



Fig. 2 Site de prélèvement et résultats de l'analyse microscopique

2.1.2 Préparation de l'essai

La méthode de préparation à l'état lâche reconstitué d'un échantillon de sable reste un sujet important dans le domaine expérimental de la géotechnique [22-24]. Il existe deux méthodes de préparation des échantillons pour les conditions sèches et saturées utilisées en laboratoire: la sédimentation avec ou sans damage sec ou humide ou la pluviation à l'aide d'un entonnoir. Pour ce faire, le bon choix de méthode doit reproduire les conditions du sol in situ.

L'objectif est de suivre l'évolution du déplacement vertical d'un intrus dans un bac à sable. Ces expériences consistent à appliquer une vibration contrôlée à un milieu granulaire. Les échantillons étudiés sont placés dans un cube en plexiglas transparent de dimensions $(11,9)^3 \text{ cm}^3$. Cette boîte est reliée à un moteur par une tige métallique, lorsque le moteur tourne horizontalement la boîte est contrainte à un mouvement sinusoïdal contrôlé par le programme informatique Matlab. La variation de la hauteur de l'échantillon de sable est définie en fonction de la densité relative nécessaire à la détermination de la masse de sable à utiliser [25]. La densité relative de l'échantillon reconstitué est définie par l'équation 1 comme suit:

$$D_r = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \quad (1)$$

où (e) est l'indice des vides.

L'intrus est un cylindre plein de densité proche de la densité du béton, il sert à contrôler et à enregistrer le déplacement d'enfoncement vertical dans le sable, l'objectif est d'étudier le déplacement du cylindre en fonction de la nature du sol étudié. Le tableau 2 regroupe les caractéristiques de l'intrus comme suit :

Tableau 2. Caractéristiques et dimensions du cylindre

	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Poids (gr)
Cylindre plein	23,4	24,7	27

Il est important de noter que pour avoir une mesure précise et un bon suivi du déplacement de l'intrus, une tige blanche a été fixée au centre de sa surface supérieure (figure 3).



(a)- TIRAvib-TYP S51120



(c)- Bornier de la carte d'acquisition



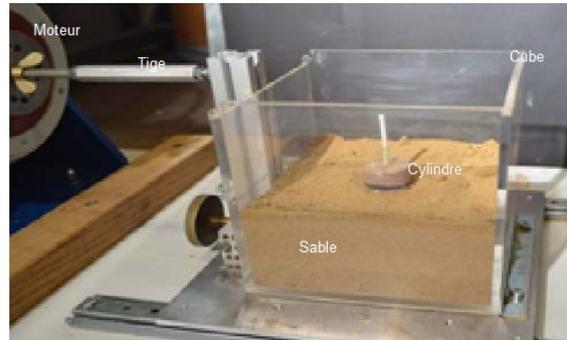
(b)- Amplificateur model BAA 500



(d)- Générateur de signaux



(e)- Camera d'acquisition



(f)- Dispositif expérimental

Fig. 3 Elements du dispositif expérimental

La préparation et le développement d'un seul test sont effectués à l'aide d'un moteur de vibreur TIRAvib-TYP S51120 couplé à un amplificateur modèle BAA 500, NI BNC-2110, générateur de signal de marque Agilent 33220A. L'ensemble est connecté à un ordinateur muni d'une carte d'acquisition pour afficher les résultats obtenus en temps réel (voir figure 3.a,b,c et d).

Afin de capturer le mouvement vertical en temps réel, une caméra numérique NIKON D5100 a été utilisée pour l'enregistrement vidéo (voir figure 3.e).

3 Test et résultats en laboratoire d'un échantillon saturé à l'état lâche

L'objectif est d'analyser le comportement du sable à différentes contraintes vibratoires; pour un échantillon saturé avec une densité relative faible (presque zéro). Par exemple, la variation de déplacement d'un intrus est présentée dans le diagramme avec un test à 10Hz et une accélération maximale au sol de $1,56 \text{ m/s}^2$.

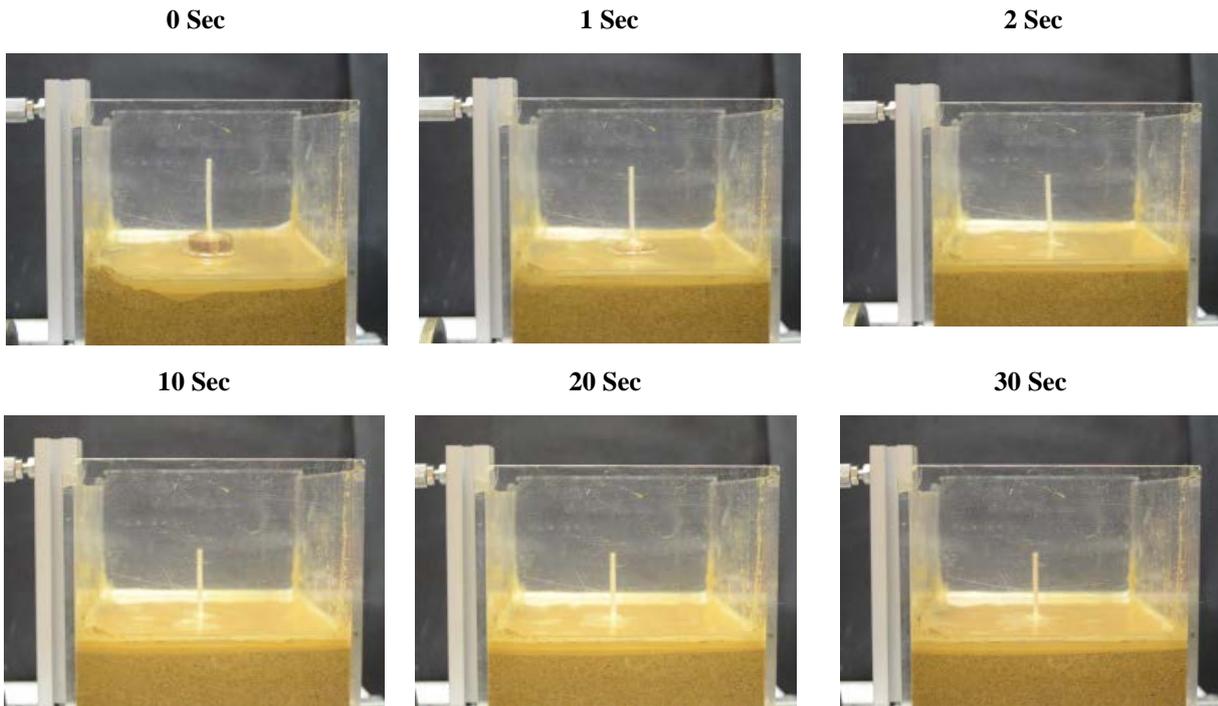


Fig.4 Capture du test effectué à 10Hz et accélération 1,56 m/s².

Le déplacement de l'intrus est important dans le bac à sable saturé qui est visible dès la deuxième seconde de l'essai. Ainsi, la présence d'eau a permis la liquéfaction du milieu et par conséquent l'amène à couler. La force d'Archimède est le facteur important dans le sable saturé [26], la présence de cette force est responsable du déplacement vertical de l'intrus [15, 18]. Pour étudier ce phénomène dans le sable saturé, des expériences systématiques sont effectuées en faisant varier la fréquence et l'amplitude des secousses en utilisant deux fréquences (10 et 14 Hz). Les résultats obtenus à partir de l'analyse sous Matlab sont présentés sous forme de diagramme (voir les figures 5 et 6). Le déplacement vertical est mesuré point par point au sommet de la tige blanche.

On remarque que le comportement de l'échantillon et à partir des résultats obtenus, le sable saturé à l'état lâche se comporte sous les vibrations constante de la même manière que ce soit sous la sollicitation 10Hz ou 14Hz, l'intrus se déplace verticalement jusqu'à atteindre un maximum suivie d'un palier constant ou le sable saturé subit un réarrangement des grains et pouvant atteindre un cas de liquéfaction.

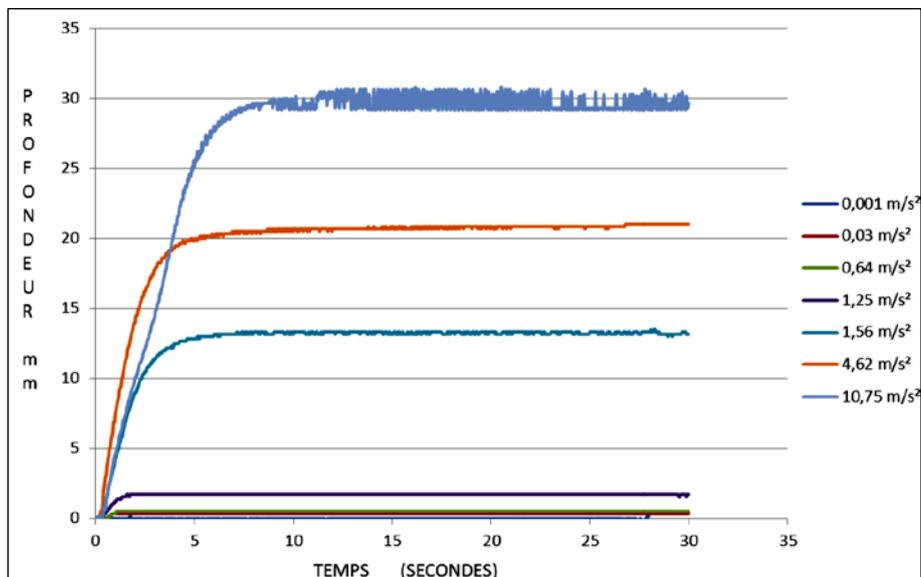


Fig. 5 Résultats de tests sous effet de vibrations constantes de 10Hz

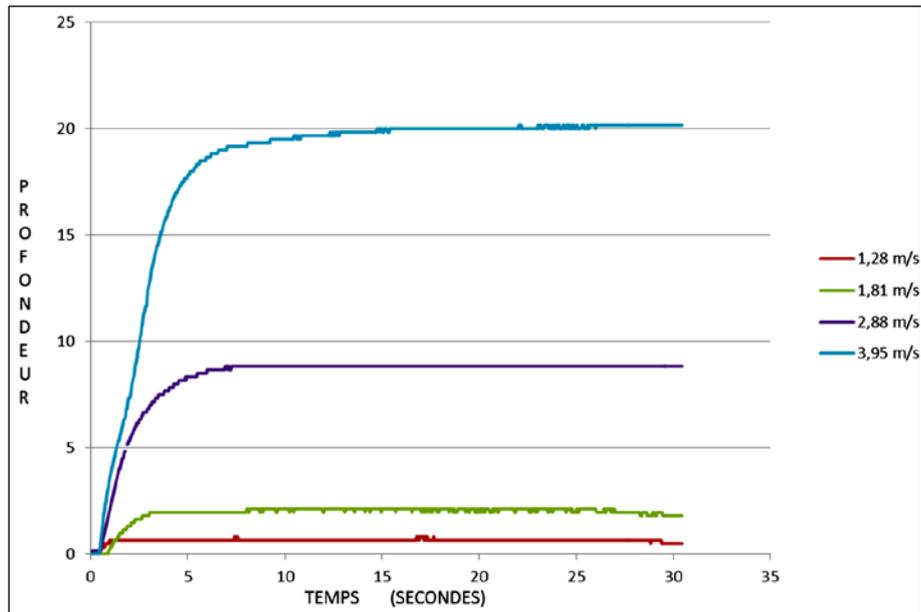


Fig. 6 Résultats de tests sous effet de vibrations constantes de 14Hz

4 Discussion

Pour étudier le phénomène de la liquéfaction du sable saturé, nous avons effectué des expériences systématiques en variant la fréquence et l'amplitude des secousses en utilisant deux fréquences. Pour différents types de vibrations, les échantillons de sable saturé sont plus susceptibles de se liquéfier que les échantillons secs. Les figures 5 et 6 montrent que les échantillons présentent le même comportement pour la même densité relative initiale et pour des vibrations différentes. À très faible amplitude, il n'y a pas de liquéfaction. Les échantillons secs peuvent également subir une liquéfaction à une accélération élevée des tremblements [18, 27]. La première phase des essais de contrainte vibratoire est telle qu'elle permet d'obtenir un déplacement atteignant un pic correspondant au maximum de dépression de l'échantillon étudié suivi d'une ligne horizontale indiquant la fin de l'essai par une perte de résistance [15-17]. Ce type de comportement peut être interprété par un réarrangement des agrégats ou une réduction de l'indice de vides. Dans les échantillons saturés, la diminution rapide de la résistance au cisaillement et la production de pression d'eau interstitielle qui en résulte peuvent être associées à la désintégration des tissus du sol. Ce processus peut se manifester par liquéfaction [28].

Nous avons rencontré trois comportements, le cas rigide, le cas de liquéfaction hétérogène et le cas de liquéfaction globalement excitée :

- Dans les cas rigides, on n'observe ni déformation du sable ni enfoncement de l'intrus, par contre on note systématiquement un tassement du sable.
- Dans les cas de liquéfaction, l'intrus s'enfonce progressivement dans le milieu.
- Dans les cas de liquéfaction globalement excitée, l'intrus à la surface du milieu bouge sans arrêt avec un déplacement plus important dans des cas de vibration intense.

Dans les trois cas de figures, le sable subit une variation de sa hauteur initiale due au réarrangement des grains.

Le tableau suivant est le récapitulatif des résultats obtenus, il est à noter que les remarques prises en compte sont compte tenu l'enfoncement de l'intrus dans le bac de sable lâche saturé (voir la figure 4) et obtenu à partir du programme utilisé sous Matlab. Le programme est divisé en trois phases :

1. Lecture vidéo : Dans cette étape, la lecture de la vidéo nous montre progressivement l'essai afin de visualiser le déplacement de l'intrus image par image (suivant 25 images/seconde) en utilisant la fonction Matlab suivante :
`[video_file_name,video_file_path] = uigetfile({'*.*'},'Pick a video file');`
2. Traitement : Dans cette phase le traitement se fait image par image en mode noir et blanc, cela nous permet de suivre plus facilement la variation du déplacement de l'intrus, la fonction utilisée est `im2bw(c,0.7)`.
3. Affichage du graphe : Après le traitement des images, le résultat est affiché directement en utilisant la fonction `plot`.

Tableau 3. Récapitulatifs des résultats.

	Essais	accélération (m/s ²)	Enfoncement max (mm)	Remarque	Conclusion
10Hz	10mVpp	0,001	0,17	0,72%	Aucun risque
	25mVpp	0,03	0,34	1,45%	Aucun risque
	35mVpp	0,64	0,51	2,22%	Aucun risque
	45mVpp	1,25	1,47	7,44%	Risque minimum
	50mVpp	1,56	13,33	56,33%	Risque de liquéfaction
	100mVpp	4,62	20,13	89,95%	liquéfaction
14Hz	200mVpp	10,75	31,36	126,9%	liquéfaction
	25mVpp	1,28	0,49	2,09%	Aucun risque
	30mVpp	1,81	1,80	7,7%	Risque minimum
	40mVpp	2,88	8,83	37,77%	Risque de liquéfaction
	50mVpp	3,94	20,16	86,22%	liquéfaction

Notes: Les remarques ont été prises en tenant compte du pourcentage d'enfoncement maximal (déplacement vertical) de l'intrus par rapport à la hauteur du cylindre ($H_{cylindre}$ représente la hauteur totale du cylindre test qui est de 23.4 mm).

4.1 Corrélation entre les résultats des déplacements max en fonction des vibrations constantes

Dans ce cadre de travail, les résultats obtenus précédemment vont nous servir à obtenir une fonction directe de la relation entre les déplacements maximums du cylindre dans le bac de sable en fonction des fréquences utilisées.

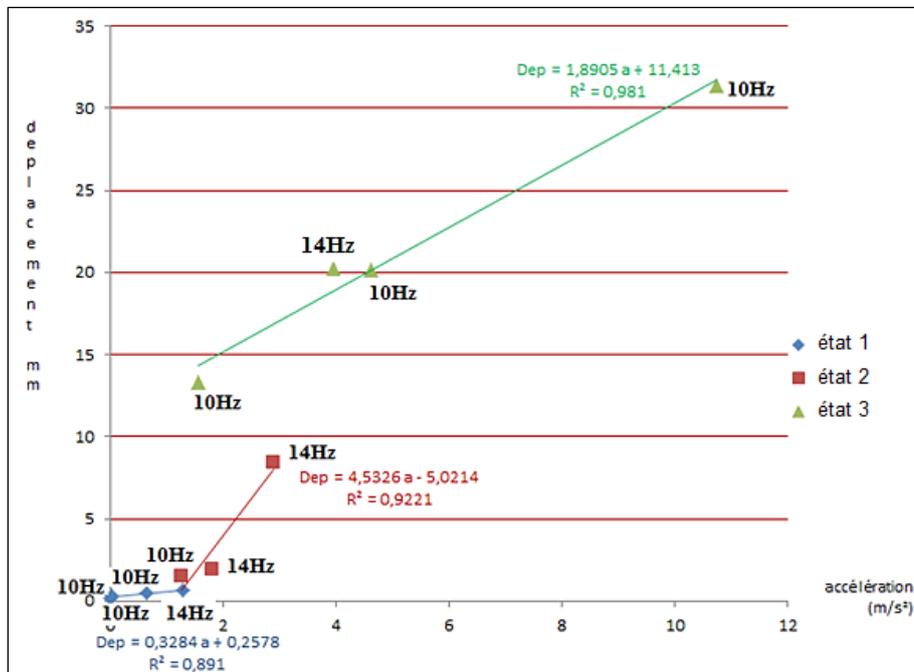


Fig. 7 Corrélation des résultats en fonction de 10 et 14 Hz

L'intrus se déplace verticalement dans le bac de sable saturé d'eau, de sorte que la présence d'eau a permis de liquéfier l'environnement [17]. Comme la force d'Archimède n'est appliquée que dans les cas saturés, sa présence est souvent responsable du déplacement de l'intrus [18].

Les résultats mesurés de profondeur maximale donnent une relation entre le déplacement de l'intrus et l'accélération de la machine selon les équations suivantes:

$$\text{Etat 1: } D_{ep} = 0.328 a + 0.257 \quad \text{si } a \in [0, 1.28] \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

$$\text{Etat 2: } D_{ep} = 4.532 a - 5.021 \quad \text{si } a \in [1.28, 2.88] \text{ m/s}^2 \quad (3)$$

$$\text{Etat 3: } D_{ep} = 1.890 a + 11.413 \quad \text{si } a > 2.88 \text{ m/s}^2 \quad (4)$$

Avec:

- D_{ep} : le déplacement maximum de l'intrus (mm),
- a : accélération de la boîte (m/s^2).

A partir de cette expérience, nous avons pu établir trois comportements:

1. État 1 (comportement rigide): correspondant à une profondeur d'intrusion inférieure à 10% de sa hauteur (ou déplacement vertical de 5 mm)
2. État 2 (comportement liquéfié (hétérogène)): entre 5 et 15 mm de déplacement, l'échantillon de sable saturé subit une liquéfaction provoquée par le remaniement des grains.
3. État 3 (comportement des fluides (liquéfaction globalement excitée)): au-delà de 15 mm, l'eau contenue dans les pores s'écoule en excitant le sol par les vibrations de la machine, le sol perd toute sa résistance.

5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié le phénomène de liquéfaction, provoqué par des secousses horizontales, dans des milieux saturés du sable prélevé du port d'Oran en Algérie. Il existe plusieurs modèles qui expliquent les cas de liquéfaction. Ces modèles présentent le même principe sachant que lorsque la densité résultante de l'accélération vibratoire (ou sismique) dépasse un certain seuil du milieu granulaire saturé, le risque de liquéfaction devient présent.

Une série de tests vibratoires a été effectuée sur du sable lâche saturé en eau avec une densité relative presque nulle sollicité par une contrainte vibratoire. Après avoir mené des expériences et à partir des résultats obtenus, on montre que le comportement des échantillons dépend directement de l'accélération imposée. Trois phases ont été établies rigide, liquéfiable et instable. Dans le cas où la hauteur d'enfoncement de l'intrus dépasse les 10%, le sable peut subir un risque potentiel à la liquéfaction. Au-delà de 30% de cette hauteur, la liquéfaction est plus présente et cela peut être interprété de manière adéquate par la variation de l'indice des vides.

Pour le sol étudié, les approches empiriques sont obtenues montrant le lien entre le déplacement et l'accélération. On peut constater que la résistance du sable décroît avec l'augmentation du rapport de la fréquence de vibration de manière linéaire.

REFERENCES

- [1]- A.K. Gulley, NFD. Ward, S.C. Cox, J.P. Kaipio, Groundwater responses to the recent Canterbury earthquakes: a comparison. *J. Hydrol.* 504(2013) 171-181. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.018.
- [2]- M.B. De Groot, M. Kudella, P. Meijers, H Oumeraci, Liquefaction phenomena underneath marine gravity structures subjected to wave loads. *J. Water. Port. C.* 132(4) (2006) 325-335. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(325).
- [3]- B.M. Sumer, Advances in Seabed Liquefaction and Its Implications for Marine Structures. *Geotech. Eng.* 45(4) (2014).
- [4]- G. Veylon, Modélisation numérique du mécanisme de liquéfaction des sols : application aux ouvrages hydrauliques. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017.
- [5]- Y. Huang, Y. Miao, Hazard Analysis of Seismic Soil Liquefaction. *Nat. Hazards.* Ed. Springer, 2017. doi:10.1007/978-981-10-4379-6.
- [6]- C. Cassar, M. Nicolas, O. Pouliquen, Submarine granular flows down inclined planes. *Phys. Fluids.* 17(2005) 103301. doi:10.1063/1.2069864.
- [7]- U. El Shamy, M A. Zeghal, Micro-mechanical investigation of the dynamic response and liquefaction of saturated

- granular soils. *Soil. Dyn. Earthq. Eng.* 27(8) (2007) 712-729. doi:10.1016/j.soildyn.2006.12.010
- [8]- A. Sawicki, J. Mierczy, On the behavior of liquefied soil. *Comput. Geotech.* 36(4) (2009) 531-536. doi:10.1016/j.compgeo.2008.11.002
- [9]- A. Ozbay, A.F. Cabalar, Effects of triaxial confining pressure and strain rate on stick-slip behavior of a dry granular material. *Granul. Matter.* 18(3) (2016) 18-60. doi:10.1007/s10035-016-0664-7.
- [10]- F. Sun, Y. Yao, G. Li, X. Li, Numerical Simulation of Supercritical-Water Flow in Concentric-Dual-Tubing Wells. *SPE J.* 23(6) (2018). doi:10.2118/191363-PA.
- [11]- F. Sun, Y. Yao, G. Li, X. Li, H. Li, G. Chen, Z. Sun, A numerical study on the non-isothermal flow characteristics of superheated steam in ground pipelines and vertical wellbores. *J. Petrol. Sci. Eng.* 159(2017) 68-75. doi:10.1016/j.petrol.2017.09.014.
- [12]- G. Varas, J-C. Geminard, V. Vidal, Air invasion in a granular layer immersed in a fluid: morphology and dynamics. *Granul. Matter.* 15(6) (2013) 801-810. doi:10.1007/s10035-013-0435-7
- [13]- B.M. Sumer, V.S.O. Kirca, J. Fredsoe, Experimental validation of a mathematical model for seabed liquefaction under waves. *Int. J. Offshore Polar.* 22(2) (2012) 133-141.
- [14]- D.S. Jeng, J.H. Ye, J.H. Zhang, P.L.F Liu, An integrated model for wave-induced seabed response under marine structures: Model verifications and applications. *Coast. Eng.* 72(2013) 1-19. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.08.006.
- [15]- C. Clément, R. Toussaint, E. Aharonov, Shake and sink: liquefaction without pressurization. Preprint submitted to *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018.
- [16]- C. Clément, R. Toussaint, M. Stojanova, E. Aharonov, Sinking during earthquakes: Critical acceleration criteria control drained soil liquefaction, *Phys. Rev. E.* 97(2-1) (2018) 022905. doi:10.1103/PhysRevE.97.022905.
- [17]- R. Toussaint, C. Clément, C. Fliedner, M. Stojanova, E. Aharonov, G. Sanchez-Colina, E. Altshuler, AJ. Batista-Leyva, E.G. Flekkøy, Sink vs. tilt penetration into shaken dry granular matter: the role foundation. preprint arXiv:1605.08024.
- [18]- G. Sanchez-Colina, L. Alonso-Llanes, E. Martinez, AJ. Batista-Leyva, C. Clément, C. Fliedner, R. Toussaint, E. Altshuler, Note: «lock-in accelerometry» to follow sink dynamics in shaken granular matter. *Rev. Sci. Instrum.* 85(12) (2014) 126101.
- [19]- K.A. Taslagyan, D-H. Chan, N-R. Morgenstern, Effect of vibration on the critical state of dry granular soils. *Granul. Matter.* 17(6) (2015) 687-702. doi:10.1007/s10035-015-0589-6.
- [20]- L. Alonso-Llanes, G. Sánchez-Colina, E. Martínez, AJ. Batista-Leyva, R. Toussaint, E. Altshuler, Intruder Penetration in Granular Matter Studied by Lock-In Accelerometry. *Rev. Cubana Física.* 33(2) (2016) 95-97.
- [21]- M. Bousmaha, H. Missoum, K. Bendani, M. Derkaoui, F. Belhouari, Experimental Study On Mechanical Instability Of Sand-Silt Mixtures. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 11(3) (2016) 2149-2156.
- [22]- G. Metcalfe, SGK. Tennakoon, L. Kondic, DG. Shaeffer, RP Behringer, Granular Friction, Coulomb Failure, and the Fluid-Solid Transition for Horizontally Shaken Granular Materials. *Phys. Rev. E.* 65 (2002) 031302. doi:10.1103/PhysRevE.65.031302
- [23]- N. Della, M. Belkhatir, A. Arab, J. Canou , J.C. Dupla, Effect of fabric method on instability behavior of granular material. *Acta Mech.* 225(7) (2014) 2043–2057. doi:10.1007/s00707-013-1083-z.
- [24]- N. Della, M. Belkhatir, A. Arab, J. Canou , J-C. Dupla, Undrained Monotonic Response and Instability of Medium-Dense Sandy Soil. *Mar. Georesour. Geotec.* 33(6) (2014) 487-495. doi:10.1080/1064119X.2014.954175.
- [25]- H. Missoum, M. Belkhatir, K. Bendani, Undrained shear strength response under monotonic loading of Chlef (Algeria) sandy soil. *Arab. J. Geosci.* 6(2013) 615-623. doi:10.1007/s12517-011-0387-3.
- [26]- D.A. Huerta, V. Sosa, M.C. Vargas, J.C. Suárez Ruiz, Archimedes' principle in fluidized granular systems. *Phys. Rev. E.* 72(3) (2005) 031307. doi:10.1103/PhysRevE.72.031307
- [27]- L. Goren, R. Toussaint, E. Aharonov, DW. Sparks, E. Flekkøy, A general criterion for liquefaction in granular layers with heterogeneous pore pressure. In: *Poromechanics V-Proceedings of the 5th Biot Conference on Poromechanics*, 2013, pp. 415-424.
- [28]- RS. Ladd, Specimen preparation and liquefaction of sand. *J. Geotech. Eng.-ASCE.* 100(10) (1974) 1180-1184.