

Contribution à l'étude des instabilités de liquéfaction d'un sable : influence du degré de saturation

Mathilde Vernay

Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, Campus Universitaire des Cézeaux Avenue, 4 Impasse Blaise Pascal, 63178 Aubière

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. *Les normes actuelles permettant le dimensionnement des ouvrages géotechniques ne préconisent pas de mesures particulières vis-à-vis du risque de liquéfaction si le sol n'est pas totalement saturé. Or plusieurs auteurs ont déjà montré que ce type d'instabilités pouvaient être observées, même lorsque le degré de saturation est inférieur à 1. Néanmoins, aucune théorie actuelle ne permet de définir la gamme de saturation pour laquelle ce phénomène est observé, ni les raisons conduisant à cette instabilité. C'est pourquoi l'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du degré de saturation sur le comportement cyclique d'un sable. La théorie proposée pour expliquer le déclenchement de la liquéfaction repose sur la continuité de la phase gazeuse au sein du milieu. Pour démontrer cela, un dispositif expérimental spécialement adapté à l'étude des sols non saturés a été développé et une campagne d'essais triaxiaux cycliques a été menée en vue de valider la théorie proposée.*

ABSTRACT. *According to current French normative legislation, saturation degree is not taken into account when studying liquefaction potential of soils. But some authors showed that soils could liquefy, even when saturation degree is under 1. This research work aims to study cyclic behaviour of sand, under various conditions of saturation. A new theory is proposed : liquefaction potential can be evaluated according to gaseous phase state. If it is continuous, liquefaction risks does not exist. If it is not, soils can liquefy. Experimental procedure and devices were specially developed to validate this theoretical frame.*

MOTS-CLÉS : *liquéfaction, sols non saturés, succion, essai triaxial*

KEY WORDS : *liquefaction, unsaturated soils, suction, triaxial test*

1. Introduction et état de l'art

Depuis peu, le contexte normatif concernant la prise en compte des risques sismiques a évolué. Les vérifications sont devenues plus rigoureuses, et la carte sismique a changé. Plus particulièrement, une prise de conscience quant aux risques de liquéfaction a émergée, et les études de risques vis-à-vis de ce phénomène se sont systématisées. Les effets de la présence d'air dans le sol sont plutôt bénéfiques vis-à-vis du risque de liquéfaction. D'une part la succion, différence entre les pressions d'air et d'eau, a pour effet d'augmenter l'attraction entre les particules et confère une plus grande rigidité au matériau. D'autre part, la compressibilité du fluide poral permet une meilleure absorption des excès de pression interstitielle. C'est la raison pour laquelle, traditionnellement, le cadre normatif ne permet pas la prise en compte du degré de saturation vis-à-vis du risque de liquéfaction lors du dimensionnement des ouvrages géotechniques.

Or plusieurs études ont mis en évidence que le risque de liquéfaction existe, même pour des degrés de saturation initiaux inférieurs à 1. Néanmoins, ces études restent majoritairement descriptives, et n'ont pas permis l'établissement d'un cadre théorique pour expliquer le phénomène.

Jusqu'à aujourd'hui, on n'arrive pas à définir un cadre précis quant à l'évaluation de l'influence du degré de saturation sur le risque de liquéfaction : jusqu'à quel degré de saturation existe-t-il un risque ? Quelle est l'influence de la succion ? Quelle est l'influence de la compressibilité du fluide poral ? L'objectif de cette étude est d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

Plusieurs auteurs ont étudié en laboratoire l'influence du degré de saturation sur le comportement cyclique des sables ([SHE 77] , [RAG 11] , [KAZ 07], ...). Ces derniers ont notamment étudié une large gamme de degrés de saturation, via la réalisation d'essais triaxiaux et l'utilisation de la technique de translation d'axes pour imposer des conditions initiales de succion particulières. Ils ont observé un état de liquéfaction pour tous les échantillons testés. Au contraire, [TSU 14] ont mis en évidence par la réalisation d'essais triaxiaux à succion contrôlée qu'il y avait peu de chance d'observer de la liquéfaction pour des degrés de saturation initiaux inférieurs à 70%. Les différentes études disponibles dans la littérature ne permettent donc pas d'évaluer de manière précise les risques de liquéfaction lorsque le degré de saturation est inférieur à 1.

Une étude menée par Unno et al. (1997) et al. (2001) a apporté des résultats originaux (15x0,15x0,15 cm) lors d'une campagne expérimentale d'essais triaxiaux à succion contrôlée par la méthode de la translation d'axes, ils mettent en évidence que la succion d'entrée d'air du matériau (succion à partir de laquelle le degré de saturation devient inférieur à 1) pouvait être un critère limite vis-à-vis du risque de liquéfaction ; pour des échantillons dont la succion initiale était supérieure à la succion d'entrée d'air du matériau, aucune liquéfaction n'a été observée. Au contraire, les échantillons pour lesquels la succion initiale était inférieure à la succion d'entrée d'air ont liquéfié. C'est une approche originale et intéressante, mais à notre connaissance, aucune autre étude n'a permis de confirmer ou pas cette théorie.

2. Cadre théorique et hypothèses de travail

2.1 Cadre théorique

Cette étude menée par Unno et son équipe a donné naissance à notre cadre théorique, qui nous sert de guide dans la réalisation des essais. Notre cadre théorique consiste à considérer trois états de saturation possibles pour un sol, comme présenté sur la Figure 1 :

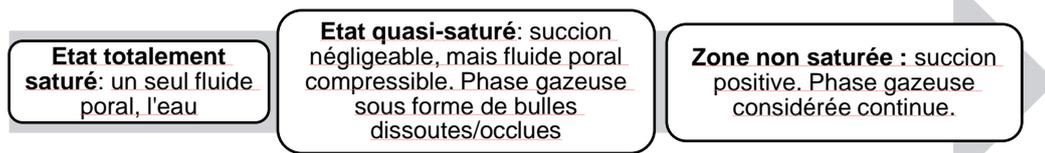
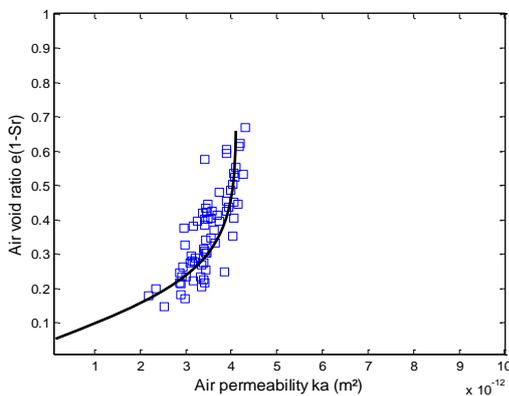


Figure 1 : Etats de saturation possibles - Cadre théorique

Notre étude se base donc sur la définition de trois états de saturation, différenciés entre eux par la présence ou non d'une phase gazeuse continue. L'établissement de ce cadre théorique, s'il est vérifié par la campagne expérimentale, permettra de définir un critère limite dans l'évaluation du risque de liquéfaction.

2.2 Hypothèses de travail

Nous définissons donc trois états de saturation possible pour un matériau. L'idée est que le potentiel de liquéfaction d'un sol va dépendre de la zone de saturation dans laquelle se trouve l'état initial des échantillons.



Il est clair que la différence entre l'état totalement saturé et l'état non saturé est la présence d'air, avec tout ce qu'implique la présence de ce fluide poral compressible : des valeurs de succion positives, et un comportement volumique fortement altéré pour l'état non saturé. La question est de savoir quelle est la différence fondamentale entre l'état quasi-saturé et l'état non saturé. Nous estimons que la différence fondamentale est la continuité ou non de la phase gazeuse. Notre hypothèse est la suivante : si la phase gazeuse est continue, alors nous avons peu de chance d'observer de la liquéfaction. Au contraire, si la phase gazeuse est discontinue, sous forme de bulles occlues par exemple, le risque de liquéfaction existe. La deuxième interrogation, qui découle de cette hypothèse est : comment

Figure 2 : Résultats des essais de perméabilité à l'air sur le sable de Fontainebleau

quantifier la continuité ou non de la phase gazeuse. Nous avons estimé pour répondre à cette question que le meilleur paramètre était la perméabilité à l'air. En effet, si la perméabilité à l'air est grande, ceci implique que l'air peut circuler facilement à travers le matériau, impliquant alors que la phase gazeuse est continue. Au contraire, si la perméabilité à l'air est très faible, ceci implique alors que le passage de l'air à travers le matériau est quasiment impossible, et donc que la phase gazeuse n'est pas continue, mais présente sous forme d'air dissout ou de bulles occlues. Ainsi, des essais de perméabilité à l'air ont été réalisés. Les résultats sont rassemblés dans le graphe de la Figure 2. Par interpolation, on cherche la valeur de l'indice des vides d'air $e(1-S_r)$ pour lequel la perméabilité à l'air k_a devient négligeable. Pour un indice des vides de 0,85, on trouve $S_r = 0,95$. Il s'ensuit qu'en dessous de 95% de saturation, la perméabilité à l'air peut être négligée. Nous considérons donc ce critère de 95% pour quantifier la continuité ou non de la phase gazeuse. En se ramenant à notre hypothèse, il semblerait donc qu'en

3. Dispositif expérimental, protocole d'essai et essais réalisés

3.1. Dispositif expérimental

L'étude en laboratoire des sols non saturés nécessite un dispositif particulier. Pour cela, nous avons adapté au laboratoire une cellule triaxiale de type Bishop et Wesley, afin qu'elle puisse permettre l'étude des sols non saturés en toute rigueur. Premièrement, l'embase de la cellule a été remplacée par une pierre poreuse à haute entrée d'air (HEA). Il s'agit d'une pierre poreuse à très faible porosité, permettant de conserver une saturation totale de la pierre malgré la dé-saturation du matériau et d'obtenir une mesure précise de la pression interstitielle. Deuxièmement, afin de pouvoir contrôler les conditions de succion initiale des échantillons testés, nous avons conçu un dispositif de plaque tensiométrique (Negative Water Column) présenté en Figure 3. En ajustant la hauteur du réservoir par rapport à l'échantillon, nous pouvons appliquer la succion souhaitée. Une description plus complète de ce dispositif est présentée par [TAR 08].

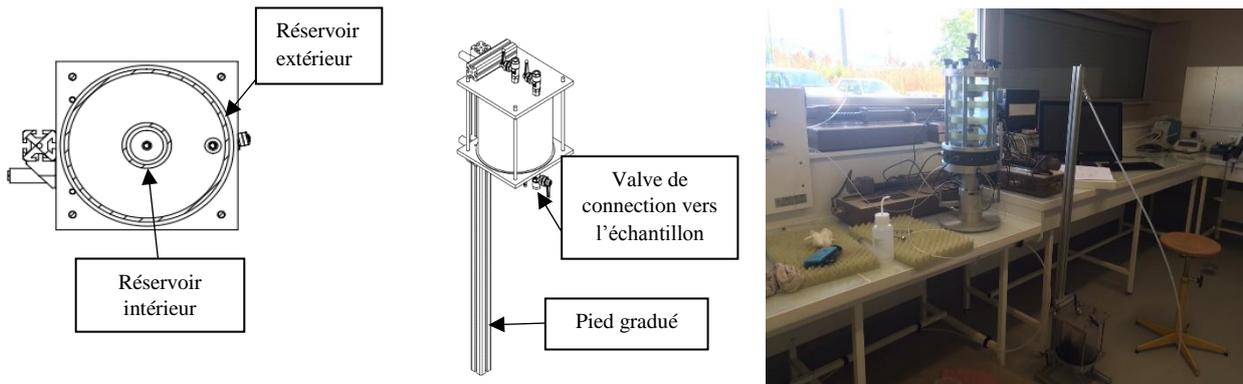
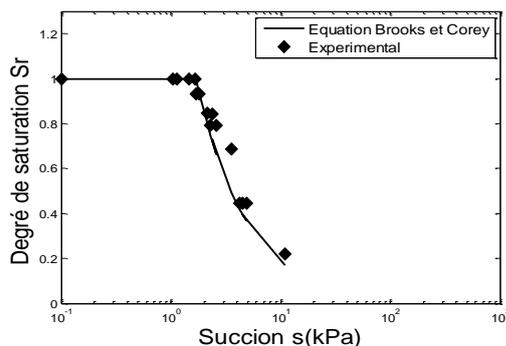


Figure 3 : Dispositif de la plaque tensiométrique et installation complète au laboratoire

Enfin, la nouveauté de notre étude réside également dans le fait que les deux échantillons non saturés ont été équipés de capteurs de déplacements type LVDT locaux, collés directement sur la membrane, permettant ainsi le suivi des déformations volumiques pendant toutes les phases de l'essai, et apportant ainsi de nouvelles informations quant au comportement volumique.

3.2. Protocole d'essai

Le matériau testé est un sable normalisé couramment utilisé dans les études de liquéfaction, le sable de Fontainebleau. Plusieurs études ont étudié le comportement des sables vis-à-vis des instabilités de liquéfaction ([BEN 01], [BAH 97], [VAI 00]). Ces études nous ont permis de fixer les différents paramètres expérimentaux. Le procédé de reconstitution des échantillons est le damage humide, afin d'obtenir un état de densité lâche ($e > 0,85$). En effet, plus la densité est faible, plus la sensibilité à la liquéfaction est grande. La contrainte de confinement appliquée est la même pour tous les échantillons, soit 100 kPa. Cette valeur de confinement a été choisie pour représenter des conditions de profondeur faible, puisque les dégâts de liquéfaction sont généralement observés in-situ sur les couches de terrain superficielles. Les échantillons sont tous consolidés sous une contrainte effective initiale de 100 kPa.



En ce qui concerne les conditions de saturation des échantillons, deux protocoles ont été établis, en fonction de la zone de non saturation considérée.

Pour la zone que nous qualifions de non saturée, c'est-à-dire pour laquelle la phase gazeuse est considérée comme continue, le paramètre initial que nous fixons est la succion. Notre but étant de vérifier si notre critère limite de 95% de saturation est un paramètre pertinent pour évaluer le risque de liquéfaction, nous avons besoin de connaître le degré de saturation initial de nos échantillons.

La succion est reliée au degré de saturation grâce à la courbe de rétention qui a été (révisée) au laboratoire par la méthode du papier filtre [BIC 07]. La courbe obtenue est présentée en Figure 4. Les losanges représentent les points expérimentaux, tandis que la ligne continue représente les valeurs obtenues par l'équation de Brooks et Corey [BRO 66].

La succion d'entrée d'air du sable testé, c'est-à-dire la succion à partir de laquelle le degré de saturation devient inférieur à 1 se situe à environ 1,5 kPa, d'après la courbe de rétention.

Concernant les essais dans la zone que nous qualifions de quasi-saturée, c'est-à-dire pour laquelle la phase gazeuse est considérée comme discontinue, les différents états de saturation initiaux ont été obtenus différemment que précédemment. En effet, aucun dispositif spécial pour l'étude des sols non saturés n'a été utilisé pour cet essai, puisque conformément à notre cadre théorique, nous considérons que pour cette gamme de degrés de saturation élevés (et supérieurs à la limite de 96%), les effets de la succion sont négligeables. Le degré de saturation de 0,98 a été obtenu avec le dispositif classique (c'est-à-dire sans la pierre poreuse HEA), en diminuant seulement le temps de circulation d'eau désaérée à travers l'échantillon. Une mesure du coefficient de Skempton B a été faite, puis un modèle développé dans notre laboratoire a été utilisé afin de relier cette valeur de coefficients de Skempton B à la valeur de degré de saturation correspondante [MOR 16].

3.3. Essais réalisés

Afin de valider notre démarche, des essais ont été réalisés dans des conditions initiales différentes, permettant l'exploration des trois états de saturation précédemment introduits. Une première phase d'essais a été réalisée sur des échantillons totalement saturés. Une deuxième série d'essais a été réalisée sur deux échantillons non saturés, avec des conditions de succion initiale positive. Enfin, une troisième série d'essais a été réalisée sur des échantillons dans la zone intermédiaire qualifiée de quasi-saturée, et caractérisée par l'hypothèse de la phase gazeuse non continue. Le Tableau 1 résume les conditions initiales des différents échantillons testés.

Nom	Succion initiale (kPa)	Degré de saturation initial
Essai_Saturé_1	0	1
Essai_Saturé_2	0	1
Essai_NonSaturé_1	3	0,80
Essai_NonSaturé_2	2	0,90
Essai_QuasiSaturé_1	-	0,98
Essai_QuasiSaturé_2	-	0,95

Tableau 1 : Caractéristiques des essais triaxiaux réalisés

4. Résultats

4.1 Essais sur échantillons totalement saturés

La Figure 5 présente pour chacun des deux essais réalisés sur des échantillons de sable de Fontainebleau totalement saturés : (a) l'évolution du déviateur des contraintes avec la déformation axiale, et (b) les chemins de contraintes. Ces premiers résultats permettent de mettre en évidence plusieurs paramètres identifiant l'initiation des instabilités puis l'état de liquéfaction complète observée sur ces deux échantillons.

L'instabilité de liquéfaction est détectée pour les deux échantillons à partir du 5^{ème} cycle. En effet, malgré le contrôle du chargement en contrainte, on voit qu'à partir du 5^{ème} cycle, la consigne de contrainte de 70 kPa ne peut plus être respectée par le système d'asservissement, ceci étant dû au fait que l'échantillon commence à perdre toute sa résistance. Parallèlement, la déformation axiale, jusqu'alors quasi-nulle augmente brusquement et atteint rapidement un taux élevé (5%). On a alors apparition de déformation plastique résiduelle définitive importante. Enfin, la liquéfaction, qui se définit comme l'annulation de la contrainte effective est visible sur les Figure : le chemin de contrainte migre progressivement vers l'état de contrainte nul, jusqu'à ce qu'il atteigne l'origine du repère, pour un état de contrainte nul. Ces résultats sont la représentation typique d'un comportement de liquéfaction [BEN 01].

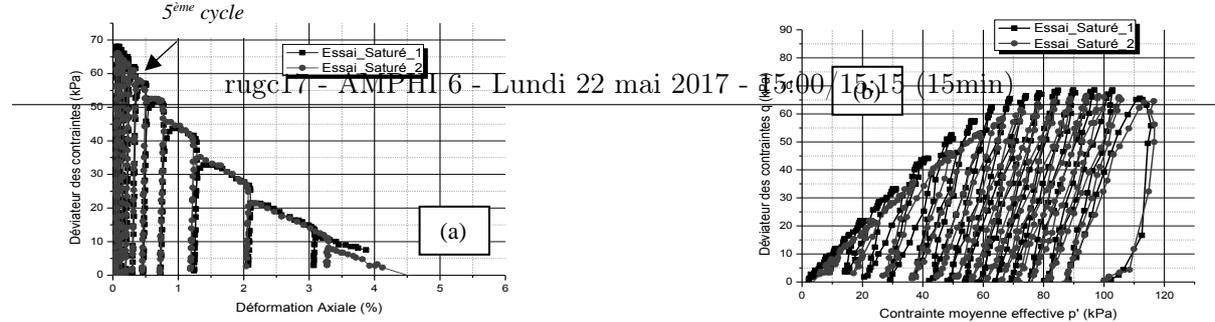


Figure 5 : Résultat des essais triaxiaux Essai_Saturé1 et Essai_Saturé_2

4.2. Essais sur échantillons non saturés

Les conditions initiales de ces deux échantillons diffèrent des échantillons présentés dans le paragraphe précédent de par l'application d'une succion initiale positive, grâce au dispositif expérimental présenté précédemment. Ils nous permettent d'évaluer l'influence d'une succion initiale au sein du matériau granulaire sur son comportement cyclique.

Comparaison saturé-non saturé

La première observation est que malgré un niveau de sollicitation appliquée beaucoup élevée sur ces échantillons que sur les échantillons saturés, on constate que les propriétés mécaniques du matériau, et notamment sa résistance au cisaillement, sont largement améliorées par la présence d'une succion initiale. En effet, comme on peut le voir sur les Figures 6 (a) et (b), des paliers de chargement jusqu'à des valeurs de déviateurs des contraintes de 350 kPa ont été appliqués, sans observer la rupture des échantillons. Le déviateur des contraintes appliqué sur les échantillons totalement saturés n'était que de 70 kPa. Néanmoins, on constate sur les derniers paliers de chargement la diminution du déviateur des contraintes pour chacun des deux échantillons, signifiant le début d'une instabilité.

Influence de la succion initiale : déclenchement de l'instabilité

Si on compare maintenant entre eux les deux échantillons non saturés, on constate que plus la succion initiale est élevée, plus le niveau de résistance pour un même taux de déformation est élevé (Figure 6). L'instabilité est déclenchée après environ 9000 cycles pour l'échantillon de succion initiale 3 kPa, correspondant au palier de chargement 300 kPa et pour un taux de déformation de 8%. L'échantillon de succion initiale 2 kPa voit le déclenchement de l'instabilité après 6000 cycles, correspondant au palier 200 kPa, pour un taux de déformation de 5%. On confirme ainsi que plus la succion initiale est élevée, plus les propriétés mécaniques du matériau sont préservées sous l'application d'un chargement cyclique. On peut aller plus loin, et noter un comportement commun entre les deux échantillons : développement rapide et brusque des déformations, qui entraîne un taux de déformation élevé (autour de 5%), puis déclenchement de l'instabilité, traduit par la diminution du déviateur des contraintes. Néanmoins, l'instabilité est déclenchée pour une contrainte appliquée d'autant plus élevée que la succion initiale est élevée.

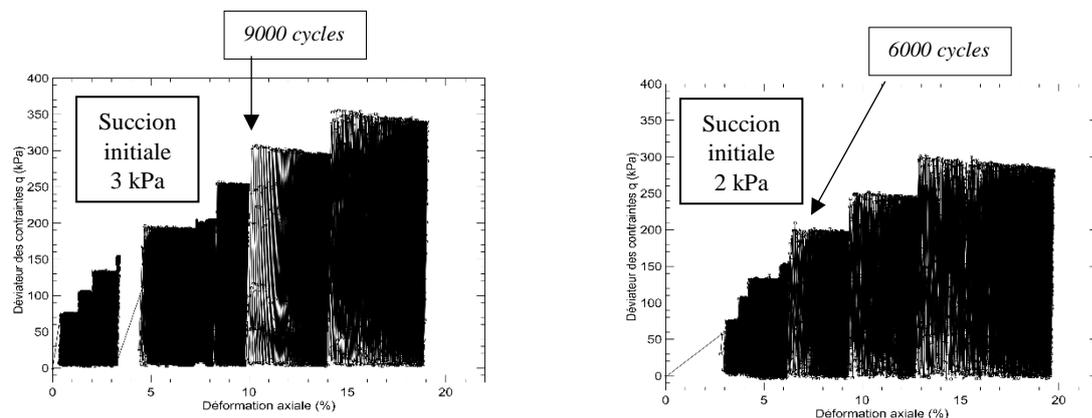


Figure 6 : Evolution du déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale - Influence de la succion initiale sur le déclenchement de l'instabilité (Comparaison Essai_NonSaturé_1 et Essai_NonSaturé_2)

En ce qui concerne les déformations, on constate que les deux échantillons ont un comportement différent. Alors que l'échantillon de succion initiale 2 kPa se déforme beaucoup dès le premier cycle (jusqu'à environ 4% de déformation axiale), l'échantillon de succion initiale 3 kPa montre un comportement initial beaucoup plus rigide, puisque la déformation axiale sur les premiers cycles (jusqu'à 2000) reste très faible (inférieure à 1,5%) pour le même niveau de contrainte appliquée (Figure 7). On montre donc que la succion initiale entraîne l'augmentation de la rigidité initiale du matériau. Par contre, la succion initiale positive n'empêche pas la dégradation des propriétés mécaniques du matériau non saturé, altération visible par le développement de grandes déformations au sein du matériau granulaire, jusqu'à un taux de 20% pour les deux échantillons. Ces observations sont cohérentes avec la théorie, puisque la succion tend à augmenter la rigidité du matériau ([DEL 01]).

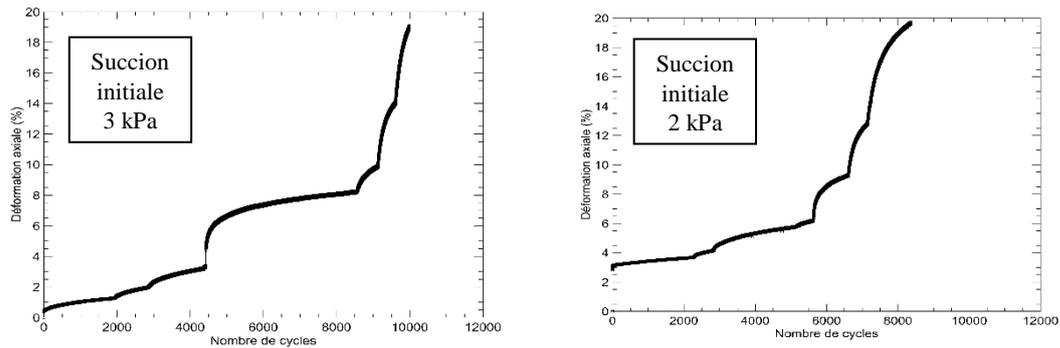


Figure 7 : Evolution de la déformation axiale avec le nombre de cycles - (Comparaison Essai_NonSaturé_1 et Essai_NonSaturé_2)

Comportement volumique

On s'intéresse maintenant au comportement volumique (Figure 8). La première remarque est qu'on observe le développement d'une déformation volumique significative (jusqu'à 6%), confirmant ainsi le rôle crucial de la compressibilité du fluide poral dans le comportement du milieu granulaire non saturé.

On rappelle que les deux phénomènes qui différencient fondamentalement les sols non saturés des sols saturés sont la succion, qui tend à rigidifier le milieu, et la compressibilité du fluide poral, qui tend à absorber l'excès de pression interstitielle. Ces deux phénomènes ont donc a priori des effets opposés. Regardons lequel de ces deux paramètres a le plus d'influence sur le comportement des échantillons non saturés.

Si le taux de déformation volumique final ne semble pas affecté par la valeur de la succion initiale, ce n'est pas le cas du comportement initial (sous les premiers cycles de chargement). L'échantillon de succion initiale 2 kPa, qui contient moins d'air que l'autre échantillon, affiche une déformation volumique moins importante pour le même taux de déformation axiale. En effet, à 3% de déformation axiale, l'échantillon de succion initiale 3 kPa a atteint une déformation volumique de 3,5%, contre seulement 1,5% pour l'échantillon de succion initiale 2 kPa. On a donc une déformation volumique d'autant plus grande que la succion initiale, et donc la quantité d'air, est grande. On peut donc conclure que pour ce matériau, et cette gamme de succion (faible), l'influence de la compressibilité du fluide poral est plus significative que celle de la succion.

Ceci est confirmé par l'observation des surpressions interstitielles lors de l'application du premier palier de chargement. Alors que pour l'échantillon de succion initiale 3 kPa (donc contenant une plus grande quantité d'air interstitielle), la pression interstitielle reste constante, ce n'est pas le cas de l'échantillon de succion initiale 2 kPa, comme présenté en Figure 9. En effet, on peut voir sur ce graphe que lors de l'application du premier cycle de chargement, la pression interstitielle augmente brutalement, jusqu'à atteindre une valeur élevée de 45 kPa. Puis la pression interstitielle diminue, et reste stable sur tout le reste de l'essai.

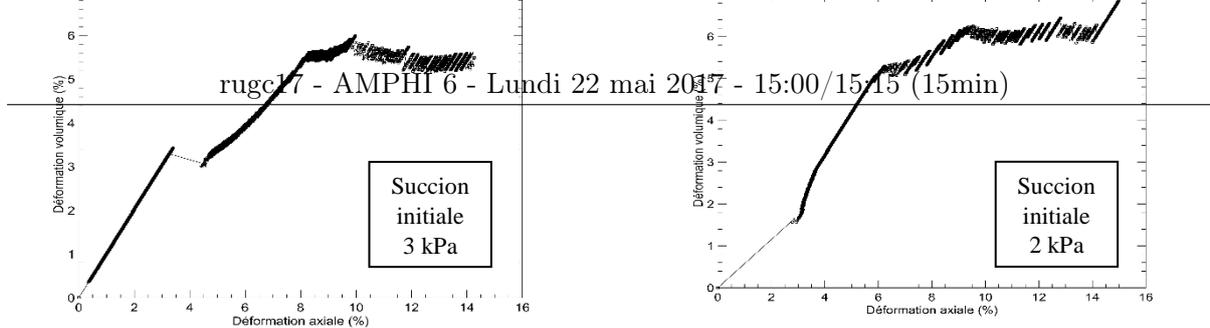


Figure 8 : Evolution de la déformation volumique avec la déformation axiale – (Comparaison Essai_NonSaturé_1 et Essai_NonSaturé_2)

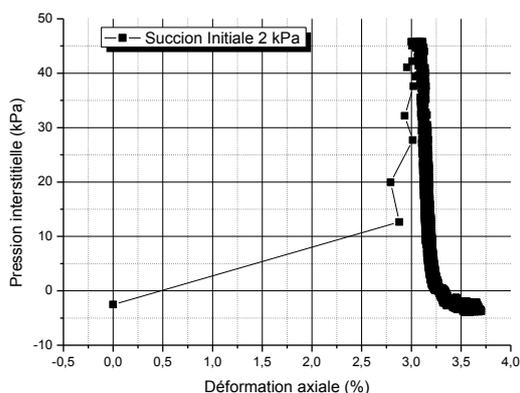


Figure 9 : Evolution de la pression interstitielle avec la déformation axiale - Essai_NonSaturé_2 (suction initiale 2 kPa)

Cette augmentation brusque est synchronisée avec l'augmentation brusque de la déformation axiale.

Ces derniers résultats montrent que la diminution de la quantité d'air au sein du matériau granulaire non saturé entraîne la diminution de l'absorption des excès de pression interstitielle, se traduisant par des pics de surpressions interstitielles d'autant plus prononcés que la quantité d'air est faible.

Pour conclure, on a montré que pour des degrés de saturation inférieurs à 95%, on n'observe pas de liquéfaction du sable de Fontainebleau au sens classique du terme, c'est-à-dire par annulation de la contrainte effective. Il semble donc que lorsque la phase gazeuse est continue, le risque de liquéfaction n'existe pas. Ces résultats confirment donc en partie notre hypothèse de travail. Néanmoins, de grandes déformations (axiale et volumique), ainsi que l'initiation d'instabilités au sein du matériau granulaire ont pu être observées.

4.3. Essais sur échantillon quasi-saturés

Ce dernier paragraphe présente les résultats des essais triaxiaux cycliques réalisés sur les échantillons de la zone quasi-saturée, c'est-à-dire pour laquelle on considère que la phase gazeuse n'est pas continue ($S_r > 95\%$).

Les résultats de la Figure 10 montrent que pour ces échantillons, la pression interstitielle augmente progressivement sous le chargement cyclique, jusqu'à atteindre la valeur de la pression de confinement. On a donc pour ces deux échantillons annulation de la contrainte effective. On a donc liquéfaction du matériau. Bien que la liquéfaction soit retardée par la présence d'air, le phénomène n'est pas empêché, malgré des degrés de saturation initiaux inférieurs à 1 (mais supérieurs à 0,95).

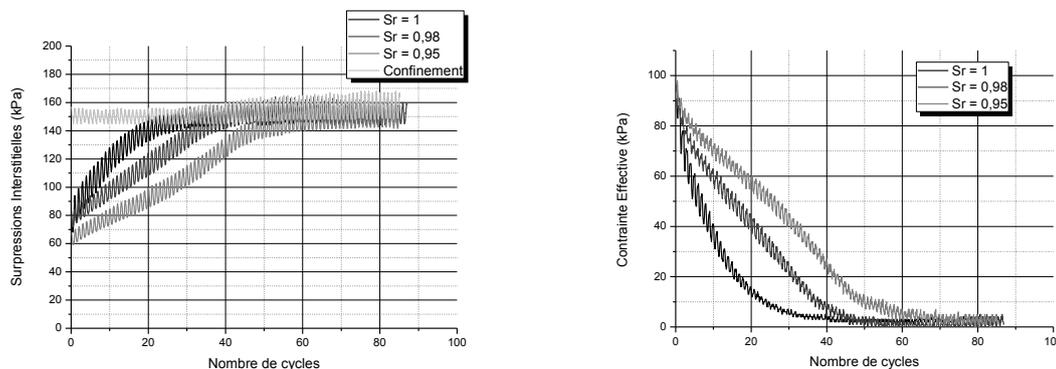


Figure 10 : Mise en évidence de la liquéfaction pour les échantillons quasi-saturés

5. Bilan et perspectives

Nous avons donc défini un cadre théorique, concrétisé par l'établissement des trois états de saturation possibles pour un matériau. Ce modèle théorique nous permet d'émettre une hypothèse de travail, qui est que la continuité de la phase gazeuse pouvait être le facteur décisif dans l'évaluation du potentiel de liquéfaction. Nous avons déterminé un paramètre permettant de quantifier la limite entre continuité et discontinuité de cette phase gazeuse, à travers la réalisation d'essais de mesure de perméabilité à l'air ($S_r = 95\%$). A partir de ces postulats, nous avons défini un cadre expérimental qui nous permet de vérifier nos hypothèses.

Les résultats nous ont montré que lorsque le degré de saturation initial est supérieur à 95%, la liquéfaction au sens classique du terme, c'est-à-dire comme l'annulation de la contrainte effective, n'est pas observée sur les échantillons testés. Au contraire, les échantillons dont le degré de saturation initial était supérieur à 95%, donc pour lesquels on considère que la phase gazeuse devient discontinue montrent un comportement très proche des échantillons totalement saturés, et ont liquéfié. Nous avons donc vérifié notre hypothèse de départ, sur un matériau granulaire. La continuité de la phase gazeuse, quantifiée en termes de degré de saturation grâce aux essais préliminaires de mesure de perméabilité à l'air semble être un paramètre pertinent dans l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sables.

Dans une optique à plus long terme, cette étude pourrait servir de base à l'élaboration d'une solution durable, écologique et économique d'amélioration des sols en utilisant les propriétés des sols non saturés.

6. Références

- [BAH 97] BAHDA, F., Etude du comportement du sable à l'appareil triaxial: expérience et modélisation, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997
- [BIC 07] BICALHO, K.V., CORREIA, A., FERREIRA, S., FLEUREAU, J.M., MARINHO, F., "Filter paper method of soil suction measurement.", *XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2007
- [BEN 01] BENAHMED, N., Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et mobilité cyclique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2001
- [BRO 66] BROOKS, R.H., COREY, A.T., "Properties of porous media affecting fluid flow.", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 92, n° 2, 1966, pp. 61–90
- [DEL 01] DELAGE P., CUI Y.J., "Comportement mécanique des sols non saturés", *Techniques de l'ingénieur*, 2001
- [KAZ 07] KAZAMA, M., UNNO, T., "Earthquake-induced mudflow mechanism from a viewpoint of unsaturated soil dynamics.", *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Springer, 2007, pp. 437–444
- [MOR 16] MORVAN, M., VERNAY, M., BREUL, P., "Study of the variation of B with S_r .", *E3S Web of Conferences*. Vol. 9 : EDP Sciences, 2016, S. 10003
- [RAG 11] RAGHUNANDAN, M. E., JUNEJA, A., "A study on the liquefaction resistance and dynamic properties of De-saturated sand.", *EJGE* Bd. 16, 2011, pp. 109–122
- [SHE 77] SHERIF, M. A., ISHIBASHI, I., TSUCHIYA, C., "Saturation effects on initial soil liquefaction.", *Journal of Geotechnical Engineering Division* Bd. 103, 1977, n° 8, pp. 914–917
- [TAR 08] TARANTINO, A., ROMERO, E., CUI, Y. J., "Preface: Special Issue on Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils" *Geotechnical and Geological Engineering* Bd. 26, 2008, Nr. 6, S. 613–614
- [TSU 14] TSUKAMOTO, Y., KAWABE, S., MATSUMOTO, J., HAGIWARA, S., "Cyclic resistance of two unsaturated silty sands against soil liquefaction.", *Soils and Foundations*, Vol. 54, 2014, n° 6, pp. 1094–1103
- [UNN 06] UNNO, T., KAZAMA, M., SENTO, N., UZUOKA, R., "Cyclic shear behavior of unsaturated volcanic sandy soil under various suction conditions.", *Unsaturated Soils 2006*, 2006, pp. 1133–1144
- [VAI 00] VAID, Y. P., SIVATHAYALAN, S., "Fundamental factors affecting liquefaction susceptibility of sands.", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, 2000, n° 3, pp. 592–606
- [VER 16] VERNAY, M., MORVAN, M., BREUL, P., "Influence of saturation degree and role of suction in unsaturated soils behaviour: application to liquefaction.", *E3S Web of Conferences*. Vol. 9 : EDP Sciences, 2016, pp. 14002