

MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE PENDANT L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE DANS UNE CHAMBRE D'ETALONNAGE - APPROCHE PHYSIQUE ET NUMERIQUE

MESURE OF THE PORE PRESSURE DURING THE PRESSUREMETER TEST IN A CALIBRATION CHAMBER - NUMERICAL AND PHYSICAL APPROACH

P.G. Karagiannopoulos^{1,2}, M. Peronne¹, P. Reiffsteck²

¹ Jean Lutz SA, Jurançon, 64110, France

² Université Gustave Eiffel – IFSTTAR – Dépt. GERS, Marne La Vallée, 77447, France

RÉSUMÉ – Une chambre d'étalonnage a été développée, équipée de capteurs de pression interstitielle et totale installés autour de la sonde, afin de réaliser des essais pressiométriques dans un environnement contrôlé. Cette communication présente les premiers essais monotones et cycliques réalisés dans du sable d'Hostun et les modélisations effectuées avec le logiciel d'éléments finis César – LCPC.

ABSTRACT – A calibration chamber has been developed, equipped with pore and total pressure sensors installed around the probe, to perform pressuremeter tests in a controlled environment. This paper presents the first monotonous and cyclic tests carried out in Hostun sand and the models carried out on the César – LCPC finite element software.

1. Introduction

L'idée de la mesure de la pression interstitielle pendant l'essai pressiométrique est basée sur le principe de Terzaghi (Figure 1) qui considère que la pression totale est la somme de la contrainte effective et de la pression interstitielle du sol.

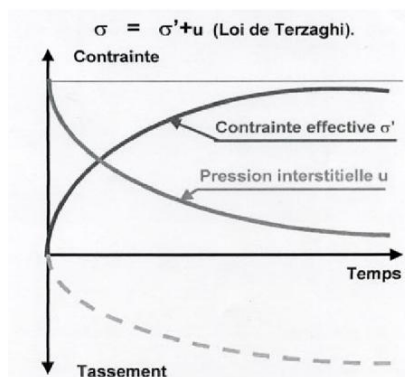


Figure 1. Principe de Terzaghi pour la distribution des contraintes au sein d'un massif de sol.

L'essai pressiométrique classique Menard permet de mesurer la pression totale appliquée au sol et il ne donne pas d'information sur l'évolution de la pression interstitielle.

L'objectif principal de cette étude est de créer un environnement bien contrôlé (une chambre d'étalonnage) dans lequel on peut mesurer avec précision les variations de la pression totale et interstitielle à différentes distances autour de la sonde, mais aussi d'imposer des conditions de drainage pendant l'essai pressiométrique.

2. Description de la chambre d'étalonnage développée

La chambre d'étalonnage développée chez JEANLUTZSA est étanche et dimensionnée pour une pression maximale de l'ordre de 10bars (pression maximale des coussins). Les capteurs de la pression interstitielle et totale sont repartis symétriquement autour de la sonde à l'intérieur de l'échantillon (figure 2) afin de minimiser l'impact de leur volume considérable sur l'homogénéité de l'échantillon.

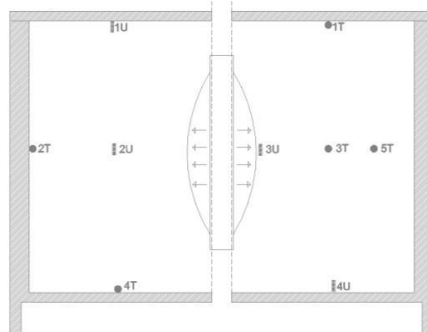


Figure 2. Répartition des capteurs dans la chambre d'étalonnage-T=pression totale, U=pression interstitielle.

Pour l'application des forces latérales et verticales à l'échantillon, des coussins gonflables de haute pression sont employés qui peuvent assurer une pression maximale de 10bars. La hauteur de la chambre est de 72cm et le diamètre 90cm qui fait au moins 15 fois le diamètre de la sonde 60mm (la plus populaire parmi les opérateurs).

Etant donné que pour des raisons fonctionnelles les coussins sont gonflés à l'air, on ne peut pas calculer le volume initial de l'échantillon et ses variations pendant l'essai pressiométrique. De même, par rapport aux conditions aux limites, seulement le cas dans lequel les contraintes aux bords restent fixes peut être mis en application (pas de contrôle du déplacement des parois des coussins). Le volume des coussins est adapté automatiquement afin de maintenir la pression appliquée aux bords constante.



Figure 3. Sonde fixée dans le centre de la chambre et sable déposé par pluviation autour d'elle.

3. Choix des géo matériaux testés

Un des objectifs principaux de notre recherche est l'étude du phénomène de la liquéfaction. Les géo matériaux qui sont propices à ce phénomène sont les matériaux drainants lâches comme les sables ($I_D < 0,4$) qui se trouvent sous une sollicitation sismique et dans des conditions non drainées instantanément. Pour cette raison, on a choisi comme matériau d'essais le sable d'Hostun qui est un matériau perméable (matériau bien documenté dans la bibliographie française). La granulométrie du sable utilisé est connue comme sable d'Hostun RF et classifiée par le producteur comme sable d'Hostun 31. Le numéro 31 indique le plus grand tamis duquel toutes les tailles de grains du sable peuvent passer. La figure 4 illustre la courbe granulométrique de ce sable de référence.

Le sable d'Hostun 31 est principalement composé de silice (99,17%). L'indice des vides peut varier entre $e_{\min}=0,62-0,64$ et $e_{\max}=0,96-1,04$ (Flavigny et al., 1992) qui nous donne $\gamma_{\max}=16 \text{ kN/m}^3$ et $\gamma_{\min}=13,1 \text{ kN/m}^3$ (en tenant compte la densité des grains solides $2,65\text{gr/cm}^3$).

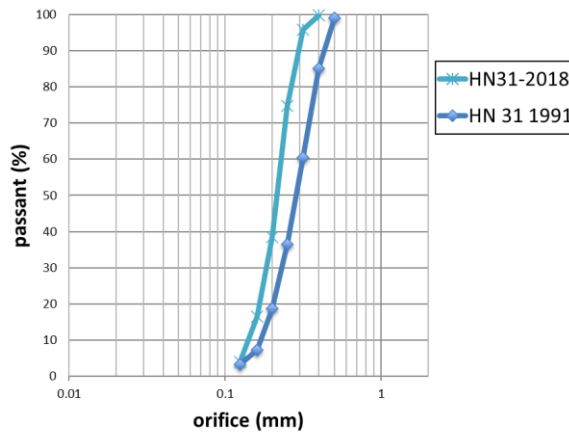


Figure 4. Courbe granulométrique du sable d'Hostun 31.

4. Reconstitution de l'échantillon

La déposition du sable est faite soit par pluviation avec une vis à grain soit par déversement humide. Les tamis utilisés pour la pluviation sont le no.6 (3,36 mm) et le no.8 (2,38 mm). De cette façon, les paramètres qui contrôlent la densité de l'échantillon sont le débit de la vis à grain et la hauteur de la pluviation du sable.

Pour le contrôle du débit, un variateur électronique a été installé qui nous permet de faire varier la vitesse de rotation de la vis à grain et ainsi, le débit de la déposition du sable. Comme on peut voir dans le tableau 1, les niveaux de vitesse sont 11.

Cependant, cette méthode de pluviation est utilisée et recommandée pour les densités plus élevées avec un indice de densité final supérieur à $I_D=0,4$. Pour les densités moins élevées, la méthode du déversement humide a été utilisée. Avec cette méthode de reconstitution, les échantillons formés sont plus lâches (même $I_D<0$).

Tableau 1. Etalonnage des différentes méthodes de pluviation

Méthode	Vitesse de rotation ou compaction (adimensionnelle)	Hauteur de pluviation(cm)	Densité γ/I_D
Pluviation à sec	7/11	60	14.5/0.46
Pluviation à sec	7/11	30	14.3/0.41
Pluviation à sec	1/11	60	15.9/0.97
Pluviation à sec	1/11	30	15.6/0.87
Déversement humide	Non	-	12.5/-0.2
Déversement humide	Oui partiellement	-	13.1/0
Déversement humide	Oui partiellement	-	14/0.31

Il faut noter que pour des raisons de sécurité, on ne peut pas atteindre une vitesse supérieure à 7/11 parce que la vis à grain commence à trembler considérablement.

5. Validation de la chambre d'étalonnage-homogénéité des contraintes

Pour le contrôle et la validation de la cuve, des essais préliminaires ont été effectués en enregistrant les pressions totales et interstitielles développées dans la chambre lors de sa mise sur pression. Le premier essai a été réalisé dans un sable sec et le deuxième dans un échantillon parfaitement saturé dans lequel toute la surpression appliquée est

transformée à une pression interstitielle (figure 5). On peut observer dans l'échantillon sec quelques petites différences sur les valeurs de la pression totale à cause de la nature du sable qui n'est pas un matériau isotrope comme l'eau même dans des conditions de déposition bien contrôlées (pluviation à sec).

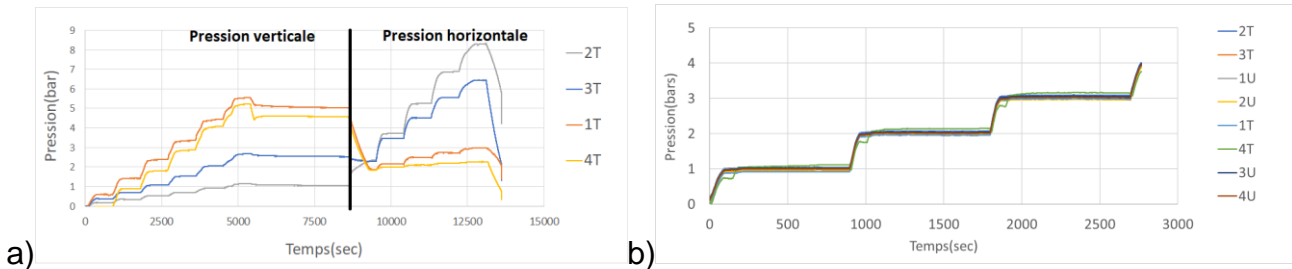


Figure 5. Pressions développées dans un échantillon a) sec et b) saturé.

6. Types d'essais effectués dans la chambre d'étalonnage

L'objectif principal de cette étude est d'abord l'observation de l'évolution de la pression interstitielle pendant l'essai pressiométrique qui permet dans un deuxième temps d'analyser son rôle au comportement rhéologique et à la portance du sol. Vu que l'échantillon du sol est constitué du sable d'Hostun (sol perméable), le type d'expérience le plus intéressant est l'essai consolidé non drainé (CU). De cette façon, on peut générer une surpression interstitielle pendant l'essai.

6.1. Essais à sec

Ces tests sont effectués afin de les utiliser comme référence à l'étude de l'influence de l'eau aux valeurs pressiométriques. En général, l'augmentation de la pression interstitielle peut être considérée comme la tendance d'un sol à se contracter et au contraire la diminution de la pression interstitielle comme la tendance à se dilater.

Tableau 2. Valeurs pressiométriques issues d'essais monotones Menard à sec dans la chambre d'étalonnage avec une sonde 60 mm

Densité (KN/m ³)	Pression de preconsolidation (σ_h' -bar)	E_M (bar)	p_{lm} (bar)	P1(bar)	P2(bar)
16,03	1	53	7	1	5,5
15,7	2	93	12,8	2	10,5
16,02	3	179	22,8	3	17
12,8	1	22	3,5	1	2,5
13	2	36,9	5,75	2	3,8
13,2	3	52,2	9	3	6

On peut déduire du tableau 2, qu'en gardant une densité constante, le comportement rhéologique du sable est très dépendant du niveau de consolidation et de la densité. Les valeurs pressiométriques classiques E_M et p_{lm} croissent avec l'augmentation du niveau de la consolidation. De plus, on peut voir dans le même tableau que les valeurs pressiométriques d'un sable lâche sont largement inférieures que pour un sable dense en gardant le même niveau de consolidation.

6.2. Essais consolidés-non drainés (essais CU)

Les mêmes essais ont été effectués mais sur des conditions non drainées après une phase initiale de consolidation à sec de l'échantillon. L'objectif principal des essais a été d'examiner l'influence de la pression interstitielle aux valeurs pressiométriques courantes (P1, E_m , etc..) et obtenir le chemin des pressions effectives pendant les essais.

En comparant les tableaux 2 et 3, on peut voir que pour les mêmes niveaux de consolidation, on obtient une pression limite supérieure pour les essais saturés mais le module pressiométrique E_m reste similaire aux essais à sec équivalents. Cette augmentation de la pression limite peut être expliquée par la présence de l'eau dans les interstices qui est largement moins compressible que l'air.

Tableau 3. Essais pressiométriques saturés monotones avec une sonde 60mm

cas	Densité (KN/m ³)	Pression de consolidation (bar)	Em (bar)	P1 (bar)	P1 (bar)	P2 (bar)
1	15.5	1	53	9.5	2,5	7.8
2	15,85	2	115	18	3.2	14.1
3	15.83	3	140	23	3.8	18
1	12,6	1	17	5,5	2,8	4,66
2	12,8	2	35	8	4,5	6,5
3	12,7	3	78	11.5	5	9

7. Simulation numérique des essais monotones -Cesar LCPC

Un modèle axisymétrique a été réalisé sur le logiciel des éléments finis Cesar-LCPC en considérant comme axe de symétrie celui de la sonde. Les éléments du maillage ont été triangulaires à 3 nœuds qui signifie plus concrètement qu'une interpolation linéaire est faite entre les nœuds pour le calcul des déplacements.

Afin de comparer les résultats dans la chambre d'étalonnage avec la simulation numérique effectuée sur le logiciel Cesar LCPC, les mêmes conditions aux limites et pression de consolidation ont été appliqués en chargeant le sol par incréments (paliers de l'essai pressiométrique) jusqu'à une pression finale supérieure à la pression limite estimée. De cette manière, on peut voir à partir de quel incrément de la pression le modèle ne converge pas. Pour être conforme à la définition de la pression limite à l'essai pressiométrique Menard, la pression qui génère une déformation de 12mm des parois de la sonde est considérée comme pression limite (doublement de la cavité). Les essais monotones avec la sonde 60mm ont été utilisés comme essais de comparaison.

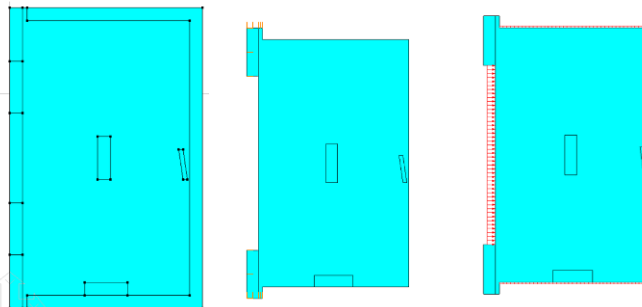


Figure 6. Modèle géométrique(gauche), conditions aux limites(milieu) et chargement de l'échantillon(droite).

Comme une première approche comparative, un modèle simple élastoplastique a été utilisé pour le comportement rhéologique du sol. Plus précisément, le modèle Mohr-coulomb sans écrouissage a été employé en considérant une cohésion nulle et un angle de frottement qui varie entre 30° et 45° selon la densité du sable. Par rapport à l'angle de dilatance une valeur de -10 est utilisée pour le cas des sables lâches et de 20° pour les essais denses. En imposant ces valeurs des angles, on a déduit la valeur du module élastique utilisé pour chaque modèle afin d'obtenir une pression limite près de celle calculée par l'essai pressiométrique équivalent (tableau 4).

Du tableau 4, on peut voir dans l'avant dernière colonne que le ratio E_y/E_m reste entre 2,3 et 2,9 pour le sable dense et autour de 4,5 pour le sable lâche (en accord avec AFNOR 2013). De plus, la pression limite calculée par la modélisation numérique se trouve très proche de celle issue de l'essai pressiométrique équivalent dans la chambre

d'étalonnage. L'écart maximal est de l'ordre de 20% qui est un facteur inférieur des coefficients souvent employés en géotechnique pour le dimensionnement des ouvrages.

Tableau 4. Données d'entrée des simulations numériques (c,φ,ψ,Ey), pression limite déduite numériquement (P_L) et comparaison avec les essais à sec dans la chambre d'étalonnage

I _D	σ _h '	c	φ	ψ	E _y (bars)	E _m (bars)	P _L (12mm)	P _{lm}	E _y /E _m	(P _L -P _{lm})/P _{lm}
100	1	0	45	20	150	53	7,7	7	2,9	10%
100	2	0	45	20	240	93	15	12,8	2,6	17%
100	3	0	45	20	400	179	25,5	22,8	2,3	12%
0	1	0	30	-10	100	22	3	3,5	4,5	14%
0	2	0	30	-10	150	36.9	5	5,75	4,3	15%
0	3	0	30	-10	230	52.2	8	9	4,4	11%

Pour le cas non drainé, on a choisi un modèle rhéologique qui n'est pas couplé avec la perméabilité de l'échantillon. Le principe de notre calcul consiste à pénaliser la rigidité en compression, en tenant compte la compressibilité de l'eau avec l'introduction dans le logiciel la porosité n et le module de compression de l'eau K_w. Ainsi, le module de compressibilité de l'ensemble de l'échantillon est exprimé par la formule :

$$K_{tot} = K_{sol} + \frac{K_w}{n} \text{ avec } K_{sol} = \frac{E_y}{3.(1-2.v)} \quad (1)$$

Où K_w : la compressibilité de l'eau, n : porosité efficace du sol, E_y=module de Young

En général, le deuxième terme est largement plus élevé que le premier si la valeur de l'eau pure est prise en compte K_w=2,2 GPa. La valeur de la porosité efficace pour le sable d'Hostun reste entre 0,25 et 0,35. En tenant compte une valeur de K_w près de 2,2GPa, l'échantillon dévient incompressible et ses déformations sont fortement réduites. Pour le module de compressibilité du gaz, une valeur autour de 2KPa peut être considérée pour les conditions ambiantes. Dans notre cas, du gaz carbonique est circulé dans l'échantillon avant l'application de la contre-pression de l'eau. Pour cette raison, une valeur de compressibilité de l'eau entre 10⁵ et 10⁶ (5*10⁵ utilisé) a été retenue pour nos calculs avec une porosité n=0,3. On peut voir dans le tableau 5 les valeurs pressiométriques issues de ce modèle non drainé dont la divergence avec les résultats pressiométriques équivalents non drainés reste dans le même ordre de grandeur que les valeurs du tableau 5.

Tableau 5. Comparaison du modèle Mohr coulomb non drainés (c,φ,ψ,Ey) avec les valeurs issues des essais pressiométriques monotones équivalents

I _D	σ _h '	c	φ	E _y	E _m	PI (12mm)	P _{lm}	E _y /E _m	(PI-P _{lm})/P _{lm}
100	1	0	45	175	53	8	9,5	3,3	15%
100	2	0	45	250	115	19	18	2,2	5,5%
100	3	0	45	360	140	24	23	2,6	4,3%
0	1	0	30	80	17	4.8	5,5	4,7	12,5%
0	2	0	30	150	35	8	8	4,3	0%
0	3	0	30	300	78	12	11,5	3,9	4,3%

8. Essais cycliques-phénomène de liquéfaction

A part les essais monotones de type Menard, plusieurs essais cycliques ont été effectués afin d'examiner la capacité de l'essai pressiométrique multicycle à évaluer le

potentiel de liquéfaction du matériau testé. Le type du chargement cyclique appliqué est le même qui a été utilisé pour les essais in situ multicycles comme décrit dans la communication de Karagiannopoulos et al. 'Essais préssiométriques cycliques avec mesure de la pression interstitielle-application à l'évaluation de liquéfaction des sols' de cette conférence (JNGG 2020). Les essais ont été limités à 50 cycles et si une déformation relative de 50% n'a pas été atteinte, une courbe de loi de puissance a été calée sur la courbe enveloppe afin de calculer le nombre des cycles jusqu'à la rupture.

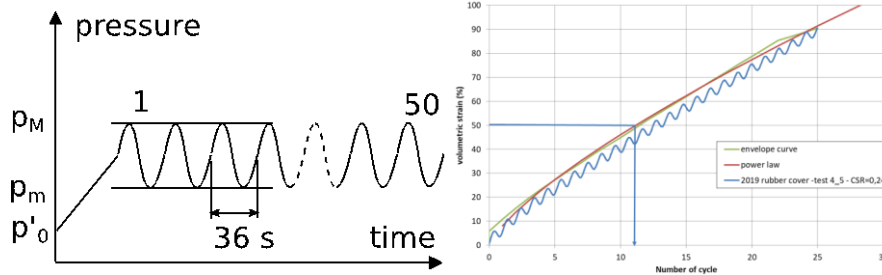


Figure 7. Définition du chargement cyclique multicycle et calcul du point de rupture par la courbe d'accumulation volumique en fonction du nombre des cycles (Karagiannopoulos et al., 2020).

Des courbes de loi de puissance (figure 8) sont tracées en reliant les différents points de rupture qui peuvent être considérées les équivalentes des courbes issues des essais triaxiaux cycliques. La densité du sable est fixée à $I_D \approx 0$ et le niveau de consolidation pour chaque essai varie entre 1 et 3bars. La densité finale de l'échantillon varie en fonction du niveau de consolidation. On peut considérer une valeur de densité relative égale à $I_D = 20-30\%$ après la fin de l'expérience pour une densité relative initiale autour de zéro.

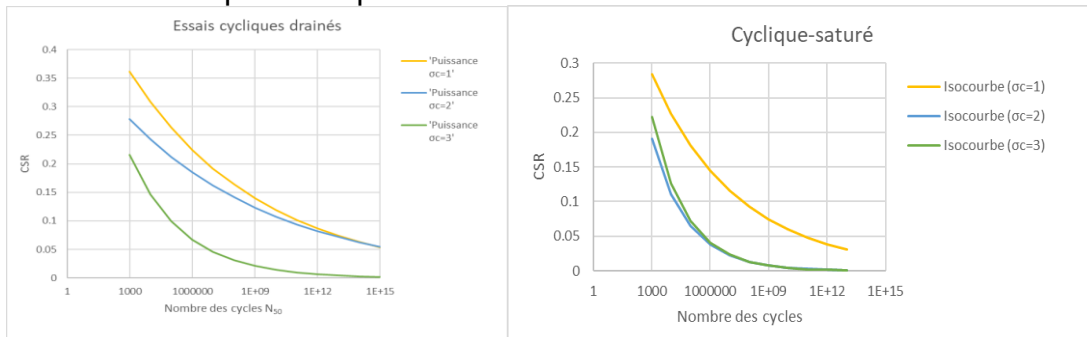


Figure 8. Courbes de résistance au cisaillement cyclique d'un sable d'Hostun lâche ($I_D \approx 0$) issues des points de rupture avec calage d'une loi de puissance pour différents niveaux de consolidation.

9. Evolution de la pression interstitielle

Pendant les essais cycliques non drainés, la pression interstitielle a été mesurée sur plusieurs distances de la sonde comme dans le cas des essais monotones. On peut constater qu'il y a une augmentation légère de la pression interstitielle pendant le cyclage qui est accentué avec l'augmentation de la contrainte cyclique (CSR). La pression interstitielle varie quasi-identiquement dans l'ensemble de l'échantillon (échantillon très perméable) et sa valeur dépend surtout du rythme de l'accumulation volumique. Cependant, le grand volume de l'échantillon par rapport à la dilatation volumique de la sonde ne permet pas une augmentation considérable de la pression interstitielle pour atteindre la pression de consolidation de l'échantillon (liquéfaction totale de l'échantillon) avec les ratios de la contrainte cyclique utilisés ($CSR < 0.4$).

Un essai typique avec différents ratios de la contrainte cyclique est illustré dans la figure 9. La pression interstitielle reste toujours inférieure à la pression totale développée dans l'échantillon pendant la durée de l'essai cyclique. Cependant, on peut voir que les deux pressions (totale et interstitielle) deviennent égales après la fin de l'expérience phénomène qui est dû surtout à la diminution brusque de la pression totale. Cette

liquéfaction de l'échantillon qui a lieu juste après le dégonflement de la sonde démontre le potentiel de la liquéfaction du sol si les variations volumiques de la cavité étaient de l'ordre du volume maximal de la sonde utilisée ($V=700\text{ml}$).

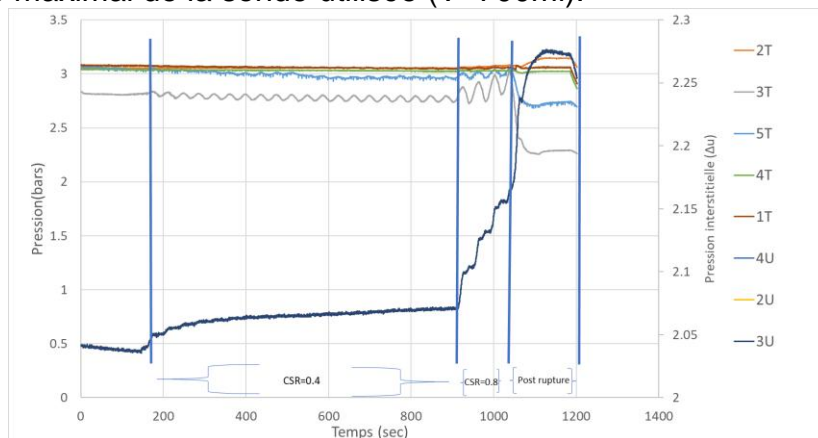


Figure 9. Valeurs des capteurs de la pression totale et interstitielle pendant un essai cyclique sous une pression de consolidation $\sigma'_c=1\text{bar}$ avec une sonde 60mm sur le sable d'Hostun 31 ($I_D \approx 0$).

10. Conclusions

Dans cette communication, les premiers essais effectués dans la chambre d'étalonnage développée chez Jean Lutz SA ont été présentés. Les résultats obtenus par le modèle numérique en utilisant la loi de comportement Mohr Coulomb sans écrouissage sont très proches avec les résultats des expériences physiques monotones faites dans la chambre d'étalonnage. Par rapport aux essais cycliques, une méthode d'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols est proposée en imposant une sollicitation multicycle à l'échantillon et en calculant le nombre de cycles pour atteindre sa rupture conventionnelle (déformation de la cavité 50%). Des courbes de lois de puissance similaires à celles issues des essais triaxiaux cycliques sont tracées pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction de l'échantillon. Cependant, l'ensemble d'essais effectués dans la chambre démontre que l'augmentation de la pression interstitielle est limitée (avec les niveaux de CSR utilisés) et correspond à la première phase d'un essai triaxial ou dans un cylindre creux non drainé. L'accumulation volumique de la sonde reste limitée par rapport au volume du sol sollicité (ratio 1/600) fait qui ne permet pas une liquéfaction totale de l'échantillon lors de nos essais multicycles dans la chambre d'étalonnage.

11. Remerciements

Ce projet est supporté et financé par Jean Lutz SA et l'agence ANRT. Le projet national Arcscop et le ministre de l'Ecologie et du développement durable ont aussi financé pour le projet Isolate et le partage des résultats est très apprécié.

12. Références bibliographiques

- Flavigny E, Desrues J, Palayer B, (1990). Note technique : le sable d'Hostun « RF », Revue Française de Géotechnique, vol. 53, pp. 67-70.
- Karagiannopoulos P., Reiffsteck P., Peronne M. (2020). Essais préssiométriques cycliques avec mesure de la pression interstitielle-application à l'évaluation de liquéfaction des sols, JNGG Lyon, 8 pages.
- Dupla J.C., (1995). Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. Thèse de doctorat ENPC, 423 pages.
- Benahmed N., (2001). Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application aux phénomènes de liquéfaction et mobilité cyclique,. Thèse de doctorat ENPC.