

CARACTERISATION DYNAMIQUE DES SOLS RESIDUELS TROPICAUX COMPACTES

Lila MOUALI¹, Daniel DIAS¹, Eric ANTOINET¹, Jean Frederic OUVRY¹, GUILLAUME VEYLON², Jérôme DURIEZ², Claudio CARVAJAL², LAURENT PEYRAS².

¹Antea Group, Orléans, France

²INRAe, Aix en Provence, France

RÉSUMÉ – Une étude expérimentale en laboratoire des propriétés dynamiques de sols résiduels tropicaux compactés a été menée à partir d'essais triaxiaux dynamiques et d'essais à la colonne résonnante. L'influence du mode de constitution des échantillons et de la densité sèche sur le module de cisaillement en petites déformations (G_0) et sur la courbe de dégradation (G/G_0) en fonction de la distorsion (γ) est illustrée dans cet article.

ABSTRACT – An experimental laboratory study of the dynamic properties of compacted tropical residual soils is carried out using dynamic triaxial tests and resonant column tests. The influences of the samples constitution mode and dry density on the shear modulus at small deformations (G_0) and on the degradation curve (G / G_0) as a function of the distortion (γ) are presented.

1. Introduction

Compte tenu du fort aléa sismique régional [1], les projets de construction de barrages en remblai sur l'île de Basse-Terre, en Guadeloupe, ont mis en évidence la nécessité d'améliorer la connaissance du comportement mécanique sous sollicitations dynamiques des sols disponibles sur site, que ce soit pour les terrains en place servant de fondation ou pour les matériaux utilisés pour la construction du remblai.

Les matériaux disponibles pour cette étude font partie de la famille des « sols tropicaux résiduels » [2,3]. Ces sols argileux proviennent de l'altération en place de roches volcaniques, sous climat tropical [3,4]. Il existe trois types de minéraux principaux pour ces types de sols : i) les résidus vitreux non altérés (feldspath ortho-silicates...), ii) les produits amorphes (allophanes) et iii) les minéraux secondaires cristallisés (halloysite, gibbsite, montmorillonite). Les allophanes et les halloysites sont des minéraux évolutifs qui rendent les propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols résiduels tropicaux sensibles à la température d'étuvage, au remaniement et à la durée du malaxage [4,5,6]. La résistance au cisaillement de ce type de sol peut être élevée malgré une densité faible ($C' = 15$ kPa et $\phi' = 30^\circ$) [5].

Les travaux de recherche présentés dans cet article sont menés sur des matériaux prélevés dans la zone d'emprunt d'un barrage en construction situé en Guadeloupe. Cet article a pour objectif la caractérisation des matériaux compactés constituant le corps du barrage.

Le programme d'essais en laboratoire, réalisé sur des matériaux compactés à teneur en eau fixée, a permis d'identifier le comportement mécanique sous sollicitations monotones (essais triaxiaux CU+u et CD, essais œdométriques) et le comportement dynamique à partir d'essais triaxiaux cycliques et d'essais à la colonne résonnante afin de déterminer l'évolution de l'amortissement (D) et du module de cisaillement (G) en fonction de la distorsion (γ).

2. Prélèvement et préparation des matériaux d'essai

Le matériau utilisé pour mener cette étude a été prélevé dans la zone d'emprunt du barrage en construction (Ile de Basse Terre), en rive gauche du barrage. Quatre cents kilogrammes de matériaux ont été prélevés à la pelle mécanique, mis en sacs hermétiquement fermés et expédiés au laboratoire d'Antea Group en métropole.

Le matériau a été criblé au tamis de 20 mm et un quartage a été effectué dans le but de l'homogénéiser et d'améliorer la reproductibilité des résultats des essais en laboratoire. Sept unités d'une soixantaine de kilogrammes ont ainsi été préparées pour mener à bien le programme d'essais prévu.

Une analyse granulométrique a été réalisée sur sept échantillons prélevés dans chacune des unités (Figure 1). On constate que le fuseau granulométrique a une largeur de l'ordre de 10 %. Le passant à 2 μm est compris entre 52 et 63 %. Le passant à 80 μm est compris entre 81 et 96 %. Par ailleurs, la limite de liquidité varie entre 62 et 73 %, la limite de plasticité entre 43 et 50 %, ce qui conduit à des indices de plasticité compris entre 12 et 27. Le matériau correspond à un silt argileux peu plastique.

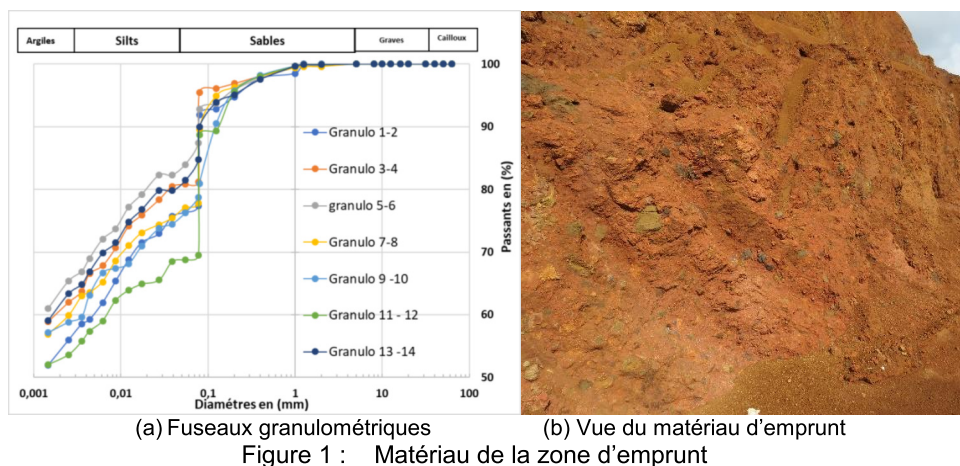


Figure 1 : Matériau de la zone d'emprunt

2.1 Composition des matériaux prélevés en zone d'emprunt du barrage

Des analyses de diffraction par rayons X (DRX) ont été réalisées après séchage à 50° C et à 105° C. L'halloysite (56 %) et la goethite (24 %) représentent 80 % de la masse totale. L'halloysite est un aluminosilicate minéral argileux. Ses principaux composants sont l'aluminium (20,9 %), le silicium (21,8 %) et l'hydrogène (1,6 %). La goethite est une variété d'oxyhydroxyde de fer(III), composé de $\text{FeO}(\text{OH})$ avec des traces de Mn et H_2O .

2.3 Préparation des éprouvettes

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes recompactées. La masse volumique sèche et la teneur en eau de moulage des éprouvettes ont été définies à partir des résultats de deux essais Proctor selon la norme NF P 094-093. La teneur en eau et la masse volumique sèche retenues à l'optimum Proctor est la moyenne des valeurs à l'optimum Proctor calculées à partir des deux essais Proctor. La teneur en eau à l'optimum Proctor $w_{\text{OPN}} = 36,25$ % correspond à une masse volumique sèche $\rho_d = 1,26 \text{ g/cm}^3$. S'agissant d'une étude mécanique pour un barrage en remblai, la teneur en eau de moulage des éprouvettes a été choisie entre 96 % et 104 % de w_{OPN} .

Pour une teneur en eau de moulage correspondant à 96 % de l'optimum Proctor, le matériau humide dont la teneur en eau visée correspond à $w_{96\% \text{OPN}} = 34,8$ % a été mis en

place en trois couches dans le moule Proctor. Chaque couche a été compactée à l'énergie Proctor. Entre chaque couche, le matériau est scarifié à 0,5 cm de profondeur. La trousse coupante est ensuite foncée dans l'échantillon et l'éprouvette est extraite à l'aide d'un poussoir (Méthode par fonçage). Pour le moulage des éprouvettes dont la teneur en eau correspond à $w_{104\%OPN} = 37,7\%$, deux méthodes ont été mises en œuvre. La première méthode consiste à malaxer le matériau à la bonne teneur en eau puis le déposer délicatement en quatre couches après scarification à l'aide d'une petite cuillère et d'un entonnoir. Un compactage a été effectué à l'aide d'un poussoir entre chaque couche (méthode compactage par couche). La seconde méthode diffère de la méthode par fonçage par le fait qu'à la fin du compactage, le moule est démonté, puis la trousse coupante est foncée progressivement à mesure que les côtés sont arasés au couteau verticalement afin d'éviter le sur-compactage du matériau et une éventuelle génération de surpression interstitielle au sein de l'échantillon (Méthode par cylindrage). La méthode par cylindrage est moins évidente à mettre en œuvre, des fissures peuvent être facilement créées. Le diamètre et la hauteur du moule cylindrique dépend de l'essai réalisé.

3. Caractérisation mécanique

Le programme d'essais était composé de :

- 4 essais œdométriques selon la norme XP P94-090-1 (éprouvette de 50 mm de diamètre et de 24 mm de hauteur) pour différentes teneurs en eau ($W_1 = 33\%$, $W_2 = 36,1\%$, $W_3 = 36,2\%$, $W_4 = 37,1\%$) dont la masse volumique sèche est $1,33 \text{ g/cm}^3$, $1,26 \text{ g/cm}^3$, $1,25 \text{ g/cm}^3$, $1,32 \text{ g/cm}^3$ respectivement.
- 5 essais triaxiaux monotones consolidés drainés et consolidés non drainés sur éprouvettes de 35 mm de diamètre, à 4 contraintes de confinement différentes (400 kPa, 600 kPa, 800 kPa, 1000 kPa) réalisés selon la norme NF P94-074. La déformation axiale visée étant de 15 %.
- 5 essais triaxiaux dynamiques : deux essais ont été réalisés selon la norme ASTM D5311-92 (essai à charge contrôlée et en fréquence) et les trois autres selon la norme ASTM D3999-91 (contrôle en déplacement et en fréquence).
- 10 essais à la colonne résonnante par application de différentes amplitudes de cisaillement par torsion sur cinq éprouvettes consolidées drainées. Les évolutions du module de cisaillement (G) et de l'amortissement (D) ont été déterminées en considérant différentes contraintes de consolidation effectives 100, 200 et 300 kPa selon la norme D4015-15. Les essais sur éprouvettes dont la teneur en eau avoisinait 96 % de l'OPN sont dénommés « Test A » et ceux avoisinant 104 % de l'OPN sont dénommés « Test D ».

3.1.1 Essais œdométriques

Des essais œdométriques à différentes teneurs en eau ont été réalisés (**Tableau 1**). Les essais œdométriques ont permis de caractériser le matériau étudié comme moyennement compressible. Le rapport $C_c/(1+e_0)$ étant dans l'intervalle de 0.15 à 0.16 avec un coefficient C_s inférieur à 0.015. Pour une contrainte verticale effective $\sigma_{v0'} = 0,15 \text{ MPa}$, le degré de sur-consolidation (OCR) induit par la préparation des échantillons variait entre 2.0 à 4.4 en fonction de la méthode de préparation (présentées précédemment) des échantillons. Le module œdométrique normalisé a été estimé dans une plage de valeur comprise entre 198 et 235 MPa.

Tableau 1. Résultats des essais œdométriques

Tests	Technique	W (%)	Eoed (MPa)	Indice des vides	σ'_p (MPa)	Cc	Cs	Cc/(1+e0)	OCR
Essai 1	Fonçage	33.0	222	0.97	0.75	0.297	0.013	0.15	4.4
Essai 2	Cylindrage	36.1	215	1.13	0.36	0.327	0.0100	0.154	2.3
Essai 3	Cylindrage	36.2	235	1.15	0.32	0.304	0.0050	0.141	2.0
Essai 4	Compactage par couche	37.1	198	1.04	0.62	0.330	0.01	0.162	3.9

3.1.2 Essais triaxiaux monotones

Les résultats de 13 éprouvettes dont la masse volumique et la teneur en eau varient respectivement entre 1,30 à 1,37 g/cm³ et 34,8 à 37,8 % ont été représentés dans le diagramme de Lambe (Figure 3). La droite de régression linéaire permet de définir un angle de frottement interne de 28 ° et une cohésion effective de 48 kPa. Le coefficient de détermination de la régression linéaire, égal à 0,95, démontre la bonne répétabilité des essais et la bonne homogénéité des échantillons testés.

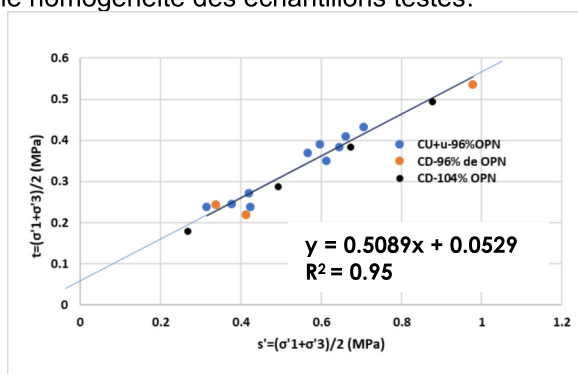


Figure 2: Diagramme de Lambe pour les 13 éprouvettes testées

3.2 Caractérisation mécanique sous sollicitations dynamiques

3.2.1 Essais à la colonne résonnante

Le test de la colonne résonnante en torsion (RC) est basé sur la théorie de la propagation des ondes de torsion dans une éprouvette avec une masse attachée à l'extrémité libre et une base fixe [14]. L'essai permet d'évaluer le module de cisaillement et l'amortissement du matériau à partir de la mesure de la fréquence de résonance du premier mode. Pour les sols fins, cet essai est généralement considéré comme non destructif pour une distorsion inférieure à 1.10⁻²%. De nombreuses mesures peuvent être effectuées sur le même échantillon et avec différents niveaux de distorsion.

L'essai à la colonne résonnante permet de déterminer l'évolution du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement en fonction du taux de distorsion.

Tableau 2 : Résultats des essais à la colonne résonnante

Tests	Moulage des échantillons	H (mm)	D (mm)	W (%)	ρ_d (g/cm ³)	Sr (%)	Indice des vides	Pc (kPa)	G _{max} (kPa)	OCR
CR-A.1	Fonçage	100.0	50.0	35.1	1.82	94.0	1.01	100	132	4.0
CR-A.2	Fonçage	100.0	50.0	35.4	1.83	95.0	1.01	200 300	142 153	4.0
CR-D.1	Cylindrage	100.0	50.0	36.1	1.73	87.0	1.13	100 200 300	107 125 148	2.3
CR-D.2	Compactage Par couche	100.0	50.0	36.4	1.75	88.0	1.11	100 200 300	98 110 127	3.9
CR-D.3	Fonçage	99.9	49.7	37.2	1.81	94.0	1.1	100	101	/

La Figure 3 présente l'influence de la contrainte de confinement sur les modules de cisaillement et l'amortissement du matériau. Une pression effective de consolidation plus élevée induit des modules de cisaillement plus élevés et des taux d'amortissement plus faibles.

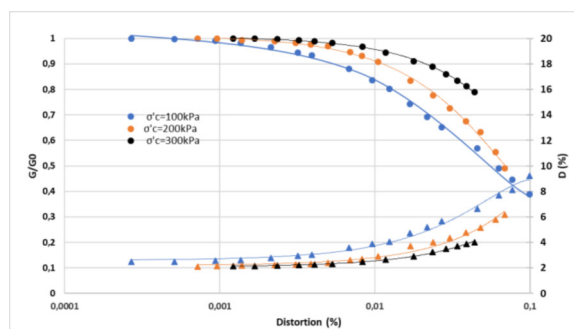


Figure 3: Résultats de D et G/G0 sur les différentes contraintes de consolidation pour les échantillons à 96%OPN.

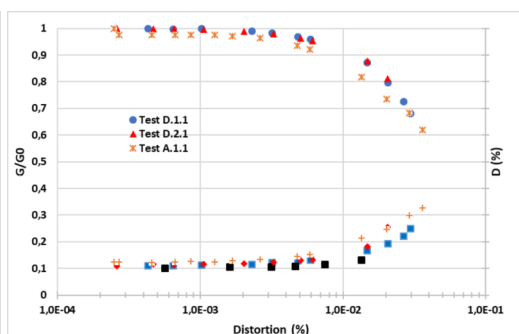


Figure 4 : Résultats de D et G/G0 sur les différentes méthodes pour une teneur en eau avoisinant 104% de OPN

Différentes méthodes ont été utilisées pour réaliser les échantillons à 104 % de l'Optimum Proctor. La Figure 4 illustre les résultats du module de cisaillement normalisé et de l'amortissement pour ces différentes méthodes. Pour une contrainte de consolidation effective de 100 kPa, la méthode de cylindrage (D.1.1) et la méthode de compactage (D.2.1) par couches donnent des résultats similaires. Cependant, pour la méthode de fonçage (A.1.1), la courbe du module de cisaillement normalisé est en dessous des courbes des deux autres méthodes.

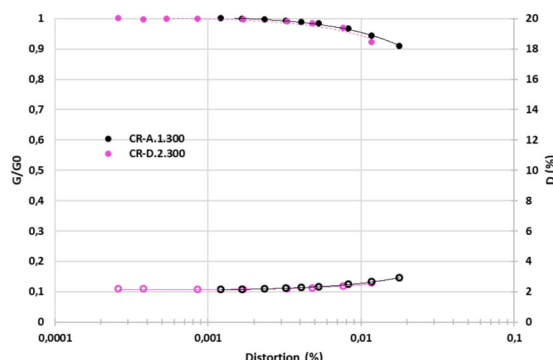


Figure 5 : Résultats à la colonne résonnante pour des échantillons à différentes teneur en eau

Pour les éprouvettes à différentes densités (96 % et 104 % de OPN), l'indice des vides et l'OCR obtenus diffèrent. Sur la Figure 5, Un ratio de sur-consolidation plus élevée donne des modules de cisaillement élevés de 35 kPa. Le taux d'amortissement sur les deux courbes est plus en moins similaire.

3.2.2 Essais cycliques au triaxial dynamique

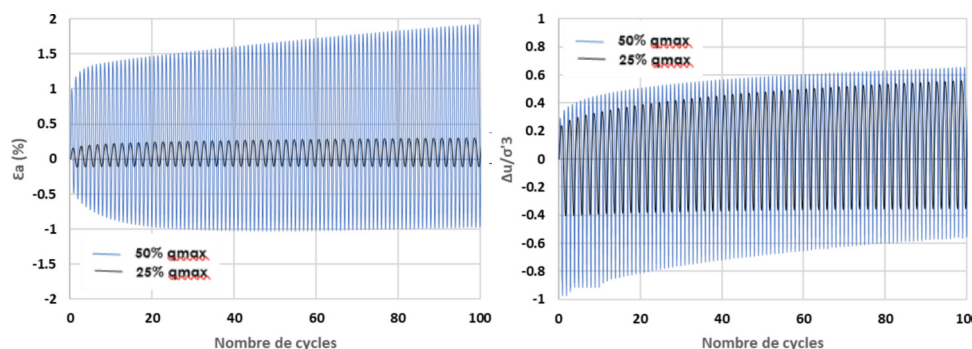
3.2.2.1 Essais de liquéfaction

La saturation et la consolidation ont été réalisées selon la norme NF P94-074. Les éprouvettes ont un diamètre de 50 mm, une hauteur de 10 mm et une teneur en eau de 35,3 %. Elles ont été saturées sous une contre-pression $u_{cp} = 400$ kPa, puis elles ont été consolidées sous une pression effective isotrope $p_c = 100$ kPa. Les cycles de chargement à force contrôlée ont ensuite été appliqués en conditions non drainées et à une fréquence de chargement (F_r) égale à 0,25 Hz.

Deux essais triaxiaux cycliques ont été réalisés à une contrainte de consolidation effective de 100 kPa et sur 500 cycles. Les résultats des essais réalisés avec $q_{cyc1} = 25\% q_{max}$ et $q_{cyc2} = 50\% q_{max}$ sont présentés à la Figure 4 et 5. La valeur de q_{max} est déterminée à partir des résultats des trois essais triaxiaux CU+u ($q_{max} = 470$ kPa)

Pour l'essai 1 ($q_{cyc1} = 120$ kPa), la déformation axiale sur les 100 premiers cycles est de 0,3 % en compression et de -0,1% en extension. A l'issue des 500 cycles, la déformation axiale est de 0,4 % en compression et de -0,2 % en extension.

Pour l'essai 2 ($q_{cyc2} = 235$ kPa), la déformation axiale atteint 1,5 % en compression et -1 % en extension sur les 100 premiers cycles. A la fin de l'essai (500 cycles), la déformation axiale maximale atteint 2,4 % en compression et -1,09 % en extension.



(a) Déformation axiale

(b) rapport de surpression interstitielle

Figure 6: Résultats des essais triaxiaux cycliques – Essais de liquéfaction

Le rapport de la surpression interstitielle sur le premier et le deuxième essai ne dépasse pas 80 %. Le critère de liquéfaction n'a pas été atteint pour aucun des deux essais ($E_a < 2,5\%$, $\Delta u / \sigma_3 < 1$).

3.2.2.2 Essais cycliques

Trois essais triaxiaux CU+u cycliques ont été réalisés à déplacement imposé et à fréquence contrôlée (mode DF) sur des éprouvettes de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur. La teneur en eau des éprouvettes varie entre 34,6 à 36,1 %. Les éprouvettes ont été saturées sous contre-pression ($u_{cp} = 400$ kPa), puis elles ont été consolidées sous des pressions effectives isotropes correspondant à $p_c = 100$, 200 et 300 kPa.

Les cycles en mode DF sont appliqués en conditions non drainées à une fréquence $f = 0,25$ Hz. Pour chaque déplacement imposé, cinquante cycles ont été appliqués pour des amplitudes axiale (ϵ_a) égales à 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % et 1 %. Les valeurs de l'amortissement et du module de cisaillement se stabilisent entre les 40^{ème} et 50^{ème} cycles pour chacun des niveaux de déformation. En conséquence, le module G et l'amortissement D ont été évalués en faisant la moyenne entre les cycles 40 et 50. La Figure 9 montre la variation de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale sur les cinquante séquences de cycle pour une contrainte de consolidation effective de 300 kPa.

Le module de cisaillement se dégrade en fonction de la variation de l'amplitude de la déformation axiale. Les aires intérieures des boucles (ϵ_a, q) augmentent avec $\Delta\epsilon_a$, ce qui induit un accroissement de l'amortissement D .

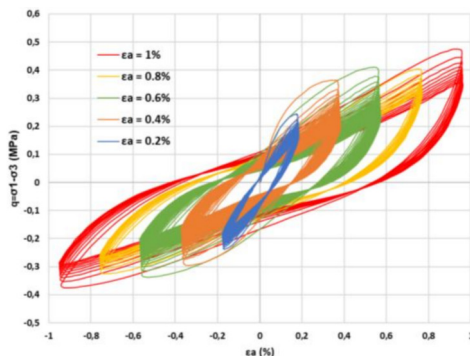


Figure 7 : Contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale pour $\sigma'_c = 300$ kPa

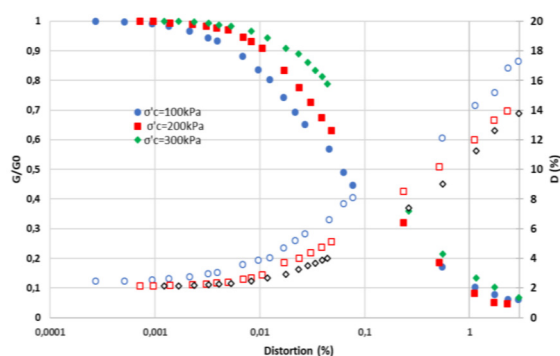


Figure 8 : Evolution de G/G_{max} et D obtenue à la colonne résonnante et au triaxial dynamique

La Figure 8 présente l'évolution du module de cisaillement normalisé et du module d'amortissement sur des petites à grandes déformations obtenues à l'aide de la colonne résonnante et du triaxial dynamique à différentes contraintes de consolidation.

4. Conclusions

Une campagne étendue d'essais d'identification et de caractérisation mécanique sous sollicitations monotones et cycliques a été réalisée sur un sol résiduel tropical compacté, prélevé sur une zone d'emprunt d'un barrage en construction situé en Guadeloupe. Les propriétés qui doivent généralement être caractérisées pour la mise en œuvre de modèles numériques sont le module de cisaillement (G) et le rapport d'amortissement du matériau (D). A partir de cette étude, une base de données expérimentales a été constituée et a permis une meilleure compréhension du comportement mécanique sous sollicitations monotones (essais triaxiaux CU+u et CD, essais œdométriques) et le comportement dynamique à partir d'essais triaxiaux dynamiques et d'essais à la colonne résonnante de ces sols.

Pour les niveaux de confinement étudiés, aucun phénomène de liquéfaction n'a été observé. Les propriétés mécaniques du matériau compacté mesurées montrent une faible compressibilité et une résistance au cisaillement relativement élevée. Les propriétés de ces sols confirment qu'ils peuvent être utilisés comme remblais.

Sur les différentes teneurs en eau mise en œuvre pour le moulage des éprouvette (96% et 104% de OPN), une variation peu marquée des paramètres mécaniques (C' , ϕ' , D , G) est constatée sur les différents essais réalisés. Cette observation permet de montrer qu'un matériau avec une teneur en eau qui se situe dans la partie humide de la courbe

Proctor (104% de W_{OPN}) peut être mis en place. Cela permettra un gain de temps lors de l'opération de séchage et donc une économie sur la construction du barrage.

L'objectif final de ce travail de recherche est de définir la loi de comportement la plus adéquate pour ce type de sol à mettre en œuvre dans une modélisation numérique ainsi que ses paramètres d'entrée.

5. Références bibliographiques

- [1] Zonage sismique de la France (entré en vigueur le 1er mai 2011). D'après l'article D.563-8-1 du code de l'Environnement.
- [2] Brenner R.P, Grava V.K. and Blight; 1997. "Shear strength behavior and measurement of shear strength in residual soils", In mechanics of residual soils G.E Blight Editor, A.A Balkema; pp 155-219.
- [3] Y. Atlan ; 1990. « Contribution à l'étude géotechnique des sols volcaniques tropicaux exemple de la Martinique », bulletin N41 de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur.
- [4] E.-R. Michalski, M. Teyssonnières, 1977, « Etude géotechnique des sols tropicaux ». Rapport BRGM 77 SGN 099 GTC,
- [5] « Sols résiduels tropicaux utilisés pour la fondation de barrage et comme matériau de remblai » ; Bulletin N° 151, Commission internationale des Grands Barrages, 2017.
- [6] Wesley, L 2009., "Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays; Geotechnical Engineering in Residual Soils".
- [7] AFNOR. Sols et reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essais Proctor normal et essais Proctor modifié. Norme française NF P 094-093, octobre 1999: indice de classement P 94- 093.
- [8] AFNOR. Sols : reconnaissance et essais - Essai œdométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. Norme expérimentale XP P94-090-1 , décembre 1997: indice de classement P 94- 090-1.
- [9] AFNOE. Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé. Norme française NF P94-074 octobre 1994: indice de classement P 94- 074.
- [10] AFNOR. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. Norme Américaine ASTM D5311-92, Janvier 1992.
- [11] ASTM International. Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus. Norme Américaine ASTM D3999 - 91(2003)
- [12] ASTM International. Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method. Norme Américaine ASTM D4015-92.
- [13] Météo France, Pluie extrême aux Antilles, article 87, 2015.
- [14] Stokoe, K., Isenhower, W.M. Hsu, J., 1980. Dynamic properties of offshore silty samples. Technical Report.