

CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT DE SOLS RESIDUELS TROPICAUX COMPACTES SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES

LABORATORY CHARACTERIZATION OF COMPACTED TROPICAL RESIDUAL SOILS UNDER DYNAMIC SOLLICITATIONS

Lila MOUALI, Daniel DIAS, Christophe POINCLOU, Eric ANTOINET

Antea Group, 803 Boulevard Duhamel du Monceau, 45 166 Olivet

lila.mouali@anteagroup.com ; daniel.dias@anteagroup.com, christophe.poinclou@anteagroup.com,
eric.antoinet@anteagroup.com

Jérôme DURIEZ, Guillaume VEYLON, Claudio CARVAJAL, Laurent PEYRAS

IRSTEA, 3275 Route Cézanne, 13 100 Aix-en-Provence

jerome.duriez@irstea.fr ; guillaume.Veylon@irstea.fr; claudio.carvajal@irstea.fr ; laurent.peyras@irstea.fr

MOTS CLEFS

Barrage en remblai, sol résiduel tropical, essais triaxiaux dynamiques, essais à la colonne résonnante.

KEY WORDS

Earth Dam, Tropical residual soils, dynamic triaxial tests, resonant column tests.

RÉSUMÉ

La construction de barrages en terre en Guadeloupe, en zone de forte sismicité, a mis en évidence la nécessité d'approfondir la connaissance du comportement mécanique des sols argileux disponibles localement. Un programme de recherche a été engagé par l'IRSTEA et Antea Group pour mieux caractériser les sols tropicaux résiduels disponibles à partir d'essais d'identification physique, d'essais mécaniques monotones et des essais cycliques à la colonne résonnante et au triaxial dynamique. Cet article présente les résultats expérimentaux obtenus.

ABSTRACT

Construction of earth dams in Guadeloupe, in a zone of high seismicity, has highlighted the need to deepen the mechanical behavior knowledge of locally available soils. An experimental research program has been initiated by IRSTEA and Antea Group to better characterize the available materials from physical identification tests, monotonic and cyclic mechanical tests. This article presents these experimental results.

1. INTRODUCTION

Pour sécuriser l'approvisionnement en eau des activités agricoles de Guadeloupe (Antilles françaises), des barrages en terre sont en projet. Le corps des barrages sera construit en utilisant au mieux les matériaux argileux locaux, qui appartiennent à la famille des sols tropicaux résiduels

La Guadeloupe est située dans une région de forte sismicité [7]. La justification de la stabilité des ouvrages sous sollicitations sismiques est requise. Des modélisations numériques sont à faire du fait la complexité des calculs. Pour mener à bien ces modélisations, il est nécessaire de disposer d'une caractérisation mécanique des matériaux sous sollicitations tant statiques que dynamiques. Afin d'améliorer la connaissance et la caractérisation des matériaux disponibles localement, un projet de recherche a été engagé par l'IRSTEA et Antea Group. Ce projet de recherche est décomposé en deux principales phases : la première vise à caractériser en laboratoire les matériaux utilisés pour constituer le corps du remblai alors que la seconde phase est dédiée à la modélisation numérique. Cet article présente les résultats des essais de laboratoire obtenus dans le cadre de la première phase.

2. PROGRAMME D'ESSAI

2.1. Prélèvement et préparation des matériaux d'essai

Le matériau utilisé pour mener à bien cette étude a été prélevé à l'été 2018 dans la zone d'emprunt du barrage de Moreau (Ile de Basse Terre), en rive gauche du barrage. 400 kg 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 été effectué dans le but d'homogénéiser sa nature et la reproductibilité des résultats au niveau des différents essais en laboratoire. 7 unités d'une soixantaine de kilogrammes ont ainsi été préparées pour mener à bien le programme d'essai prévu.

La courbe granulométrique a été mesurée sur 7 échantillons prélevés dans chacune des unités. La Figure 1 montre des fuseaux granulométriques proches. Le passant à 2 μm est compris entre 52 et 63 %. Le passant à 80 μm est compris entre 81 et 96 %. 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.

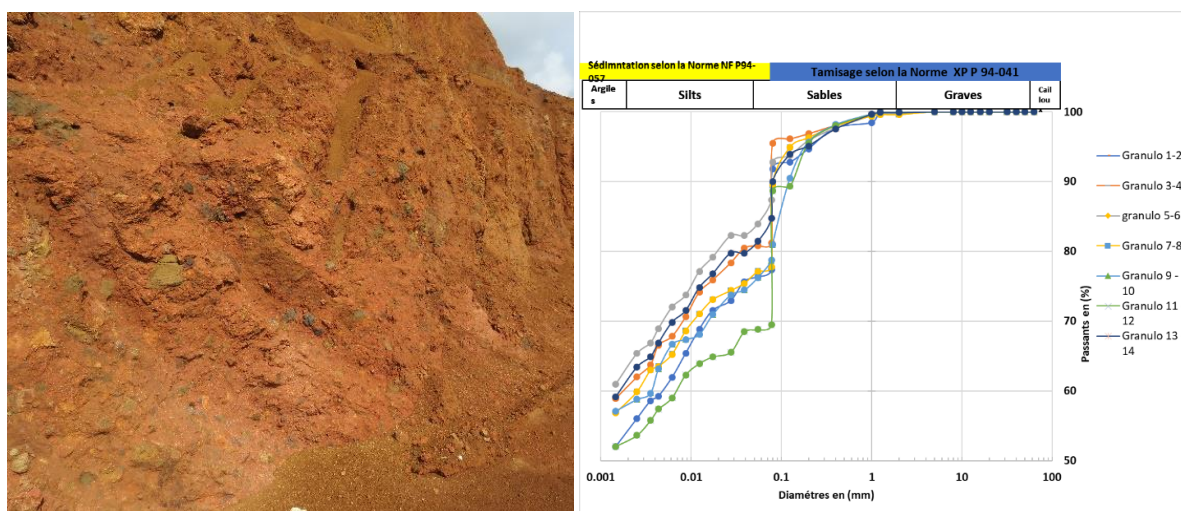


Figure 1: Vue du matériau de la zone d'emprunt à gauche et du fuseau granulométrique des 7 essais à droite

2.2. Composition des matériaux prélevés en zone d'emprunt du barrage de Moreau

Les matériaux argileux disponibles pour cette étude font partie de la famille des « sols tropicaux résiduels » [1,2]. Le comportement de ce type de sol dépend de deux facteurs : la nature des particules et leur état. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être influencées par la température d'étuvage, le remaniement et la durée du malaxage [3,4,6]. Des analyses de diffraction par rayons X (DRX) ont été réalisées après séchage à 50° C et à 105° C. Le Tableau 1 récapitule la composition massique des deux échantillons : l'halloysite (56 %) et la goethite (24 %) représentent 80 % de la masse totale. L'halloysite est un minéral constitué de feuillets de kaolinite, séparés par une couche d'eau monomoléculaire. La goethite est un minérale de la variété d'hydroxyde de fer.

Tableau 1 : Composition minéralogique du matériau après séchage à 50°C et 105°C

Minéraux	% massique	
	séchage à 50° C	séchage à 105° C
Halloysite	56	57
Goethite	24	24
Gibbsite	9	9
Chlorite	5	1
Quartz	3	5
Anatase	3	3
Maghémite	En trace	1

Les essais montrent que la température de séchage ne change pas la composition minéralogique des échantillons, il a été retenu pour l'ensemble des essais présentés dans cette étude une seule température de séchage de 50° C.

2.3. Définition du taux de compactage et perméabilité

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes recompressées. La masse volumique sèche et la teneur en eau de moulage des éprouvettes ont été définies à partir des résultats de deux essais Proctor (Figure 2). S'agissant d'une étude mécanique pour une digue en remblai, les valeurs retenues pour le moulage des éprouvettes correspondent à 96 % de l'optimum Proctor. Ce choix a été fait afin de se placer dans la partie sèche de la courbe Proctor, fournissant des caractéristiques mécaniques plus élevées.

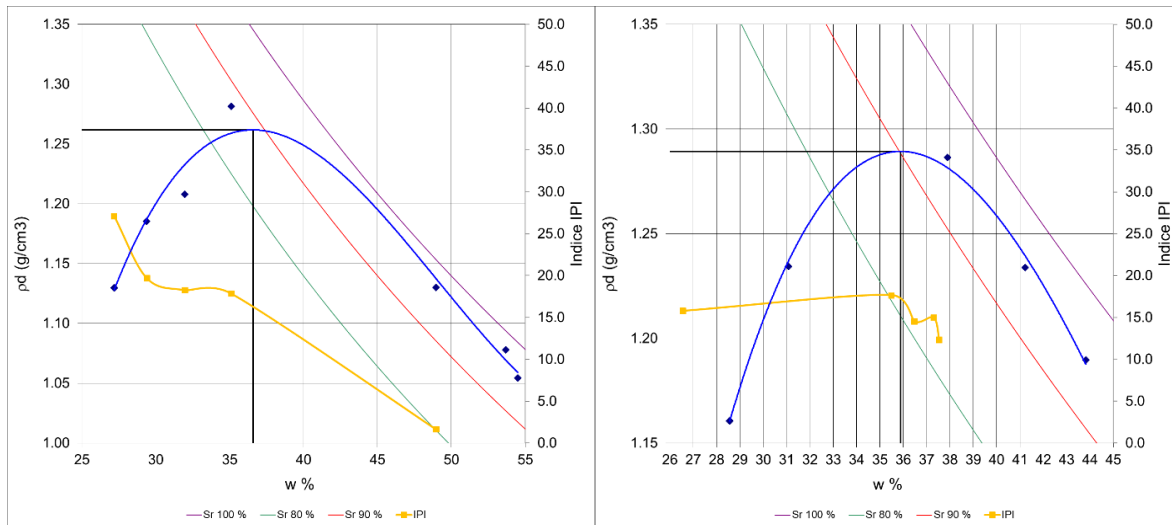


Figure 2: Essais Proctor (réalisés selon la norme NF P 094-093)

Trois essais de perméabilité à charge variable ont été réalisés pour 3 niveaux de contraintes correspondant à 86 kPa, 172 kPa et 344 kPa correspondant à l'état confinement régnant en pied de barrage et dans le remblai pour des hauteurs de 10 m et 15 m. Les perméabilités verticales mesurées sont respectivement égales à : $K_1= 1,1 \cdot 10^{-7}$ m/s, $K_2= 1,7 \cdot 10^{-8}$ m/s, $K_3= 2,4 \cdot 10^{-9}$ m/s.

3. CARACTERISATION MECANIQUE

3.1. Programme d'essais

Le programme d'essais comporte :

- Essais œdométriques selon la norme XP P94-090-1 (éprouvette de 50 mm de diamètre et de 24 mm de hauteur),
- 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). La déformation axiale visée est de 15 %.
- Essais triaxiaux dynamiques : saturation, consolidation puis cisaillement non drainé des éprouvettes à 100 kPa de contrainte de consolidation effective – fréquence de sollicitation de 1 Hz. La force cyclique appliquée correspond à 25 % et 50 % du déviateur maximum ($q_{\max}=480$ kPa), évalué lors des essais triaxiaux monotones consolidés non drainés (CU+u).
- Essai à la colonne résonnante par application de différentes amplitudes de cisaillement par torsion sur trois éprouvettes consolidées drainées. Les évolutions du module de cisaillement G et de l'amortissement ont été déterminées sur des éprouvettes consolidées à 100, 200 et 300 kPa.

3.2. Caractérisation mécanique sous sollicitations monotones

3.2.1. Compressibilité à l'œdomètre

L'essai œdométrique a permis de caractériser le matériau étudié comme moyennement compressible (rapport $C_c/(1+e_0)$ égal à 0,15 avec un coefficient C_s très faible de 0,013). Pour une contrainte verticale effective de $\sigma_{v0}' = 0,36$ MPa, la contrainte de préconsolidation σ_p' est évaluée à 0,75 MPa, soit un ratio de surconsolidation induit par la préparation des échantillons d'un peu plus de 2. Le module œdométrique normalisé est estimé à 220 MPa.

3.2.2. Résistance au cisaillement mesurée à la presse triaxiale

Les résultats de 13 éprouvettes ont été positionnés dans le diagramme de Lambe : la droite de régression conduit à évaluer l'angle de frottement interne à 31° et la cohésion effective est estimée à 48 kPa. Le coefficient de corrélation de 0,94, montrant un comportement homogène des échantillons.

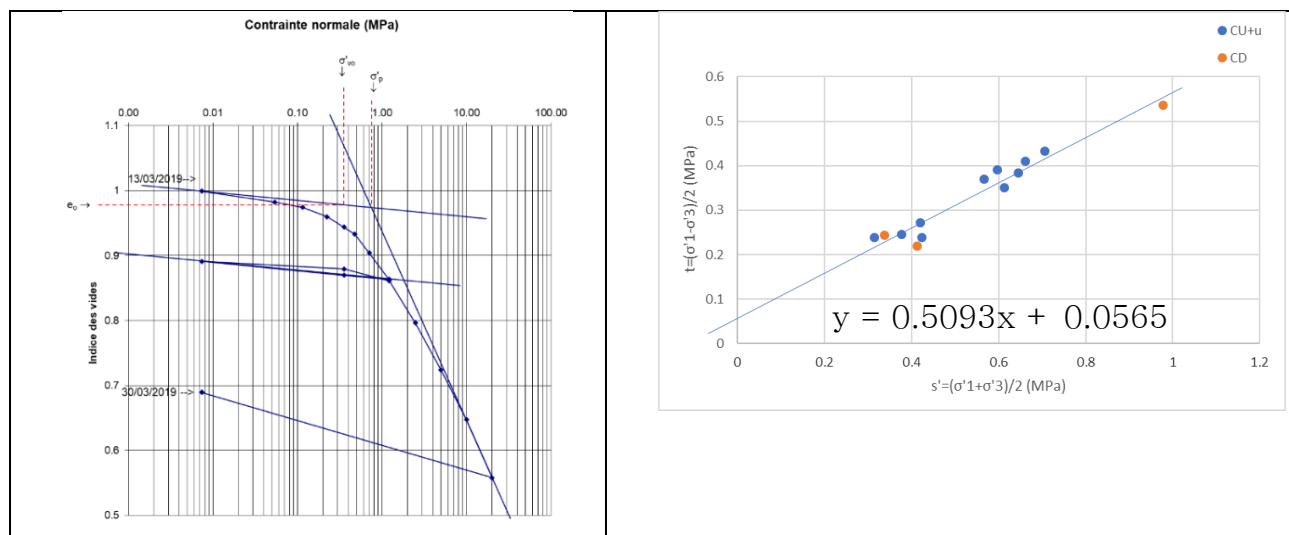


Figure 3: Essai œdométrique à gauche, diagramme de Lambe pour les différents essais triaxiaux à droite.

3.3. Résultats mécaniques sous sollicitations dynamiques

3.3.1. Essai triaxial dynamique

Les 2 essais triaxiaux cycliques sont réalisés à une contrainte de consolidation effective de 100 kPa et sur 500 cycles. Les résultats des essais réalisés avec $q_{cyc} = 25\%q_{max}$ et $q_{cyc} = 50\%q_{max}$ (Figures 4 et 5) sont présentés ci-dessous :

- Pour l'essai 1 (force de 240 N), La déformation axiale sur les 100 premiers cycles est de 0,3 % en compression et -0,1% en extension. A l'issue des 500 cycles, la déformation axiale est de 0,4% en compression et -0,2% en extension.
- Pour l'essai 2 (force de 460 N), 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.

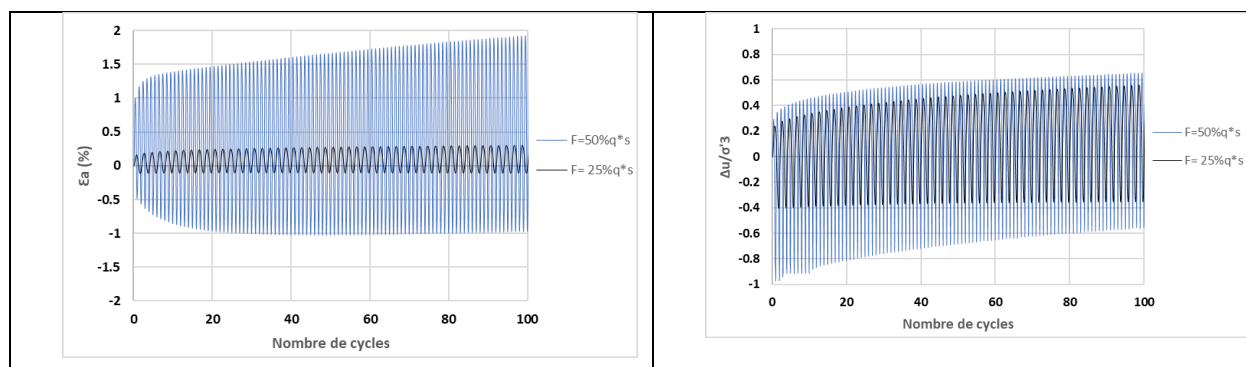


Figure 4: Déformation axiale en fonction du nombre de cycles à gauche, rapport de surpression interstitielle en fonction du nombre de cycles à droite

Le rapport de la surpression interstitielle sur le 1^{er} essai ne dépasse pas 0.8. Le rapport de la surpression interstitielle devient constant (< 0.7) à partir du cycle 400 sur le 2^{ème}.

La contrainte déviatorique maximale atteinte est de 140 kPa pour l'essai 1 et 220 kPa pour l'essai 2.

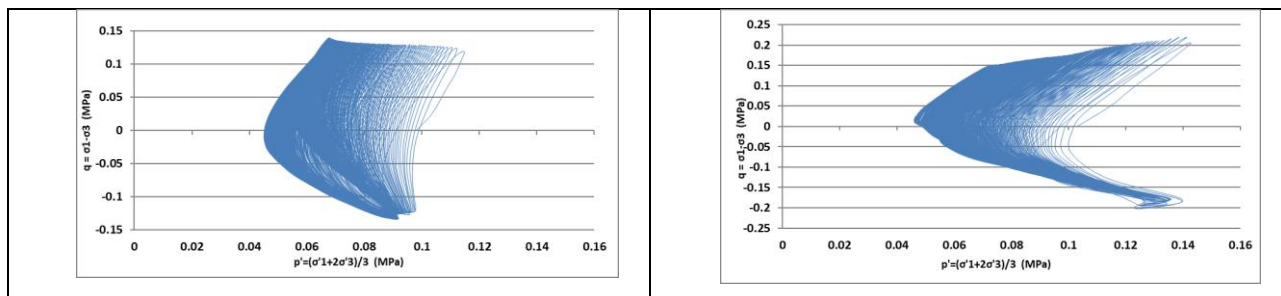


Figure 5: Déviateur en fonction de la contrainte moyenne effective Force =240 N à gauche et Force=460 N à droite

Aucun phénomène de liquéfaction n'a été constaté sur les deux tests ($\epsilon_a < 2.5\%$, $\Delta u/\sigma_3 < 1$).

3.3.2. Essai à la colonne résonnante

L'essai à la colonne résonnante permet de tracer l'évolution du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement en fonction de la distorsion. Les essais ont été réalisés pour trois pressions de consolidation.

Une pression effective de consolidation plus élevée donne des modules de cisaillement plus élevés et un taux d'amortissement plus faible (Figure 6).

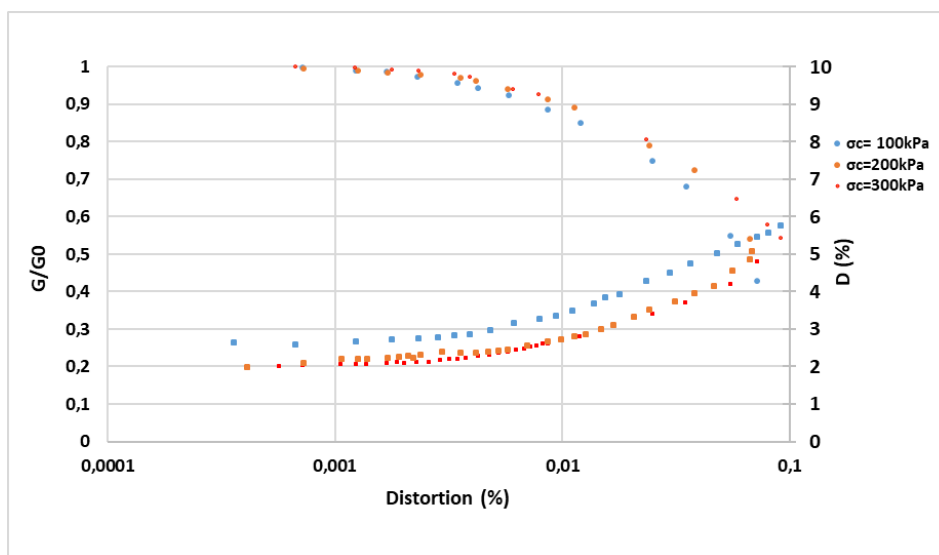


Figure 6: Essais à la colonne résonnante

Selon Vucetic et Dobry [5], la plasticité des argiles contrôle la réponse dynamique en termes de module de cisaillement et rapport d'amortissement. La Figure 7 montre que les modules de cisaillement normalisé du matériau testé pour les trois essais s'inscrivent entre le fuseau de l'indice de plasticité (IP) de 15 à 30%. Ce résultat est cohérent avec les valeurs de l'IP compris entre 12 à 27 %.

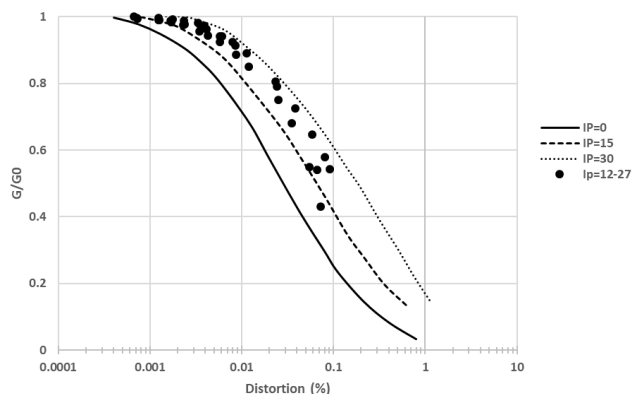


Figure 7: Influence de l'indice de plasticité sur le matériau étudié comparé à la littérature

Vucetic et Dobry (1991)

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une large gamme d'essais d'identification et de caractérisation mécanique soit monotones soit cycliques ont été réalisés sur un sol résiduel tropical compacté, prélevé sur une zone d'emprunt du barrage de Moreau. Les composants dominants de cette argile rougeâtre sont l'halloysite et la goethite.

Les propriétés mécaniques mesurées montrent une compressibilité faible et une résistance au cisaillement relativement élevée. Ceci est dû, en partie au choix effectué de travailler sur un matériau avec une teneur en eau inférieure à celle correspondant à l'optimum Proctor. Dans la réalité des chantiers de terrassement en Guadeloupe, un matériau plus humide est généralement mis en œuvre. Des séries d'essais complémentaires sont en cours pour évaluer le comportement de ces matériaux pour une teneur légèrement supérieure à l'optimum Proctor.

Pour les essais sous sollicitations cycliques, le projet de recherche prévoit des tests à différentes contraintes de confinement (500, 600 et 800kPa). Les résultats décrits dans cet article correspondent à ceux obtenus avec une contrainte de confinement de 500 kPa. Pour une telle valeur, aucun phénomène de liquéfaction n'a été constaté. Les déformations axiales sur 500 cycles restent inférieures à 2,5%.

Les résultats obtenus à la colonne résonnante montrent que le comportement de ces argiles tropicales est cohérent avec la connaissance d'autres matériaux argileux présentant des indices de plasticité similaires (entre 15 et 30).

L'ensemble de ces résultats servira à la calibration et à la validation de modèles de comportement adaptés à ce type de sol dans le cadre de la phase de modélisation numérique (modèles de comportement PM4Sand, PM4Silt, Plastic Hardening et Cam-Clay).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] E.-R. Michalski, M. Teyssonnières, 1977, « Etude géotechnique des sols tropicaux ». Rapport BRGM 77 SGN 099 GTC,
- [4] « Sols résiduels tropicaux utilisés pour la fondation de barrage et comme matériau de remblai » ; Bulletin N° 151, Commission internationale des Grands Barrages, 2017.
- [5] Vucetic, M. & Dobry, R., 1991. "Effect of soil plasticity on cyclic response", Journal of Geotechnical Engineering.
- [6] Wesley, L 2009., "Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays; Geotechnical Engineering in Residual Soils".
- [7] 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.

REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé dans le cadre du programme PIVOTS soutenu par la région Centre-Val de Loire. Cette opération est cofinancée par l'Union européenne et la région Centre-Val de Loire. L'Europe s'engage en région Centre-Val de Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional.