

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES, TECHNOLOGIE ET
GEOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCE

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE EN GEOSCIENCES

ET APPLICATIONS

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Laboratory of Geosciences of Superficial Formations and Applications

**CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX ROCHEUX
EN VUE L'IMPLANTATION DE L'IMMEUBLE SIEGE DE L'AGENCE
DE REGULATION DES TELECOMMUNICATIONS, YAOUNDE
(CENTRE-CAMEROUN)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Science de la
Terre*

Option : Sol, Eau, Sciences Géotechniques

Spécialité : Sciences Géotechniques

Par

ELIGUENE FRANCK GISLAIN

Matricule : 16S2722

Licencié ès – Sciences de la terre

Sous la direction de

ZO'O ZAME Philémon

Maître de Conférences

Université de Yaoundé I



Année académique 2021/2022

A

Mes parents, Le Couple MONTOKI, Le Couple TCHAPMI
Et BEHOUMIE Yvette Rose ;

Mes grands-parents, Ida MBANG, Marie NDEME
et Raymond MBANG.

REMERCIEMENTS

Si le diplôme est une réflexion personnelle, chacun sait qu'il est enrichi par la discussion et les précieux conseils de tous ceux qui ont pris le temps de s'y intéresser. Le présent travail est le fruit de la collaboration de plus d'une personne. Je voudrais tour à tour exprimer ma gratitude envers chacune d'elle.

Je remercie le Seigneur mon Dieu, pour avoir rendu possible la réalisation de cette œuvre. Je lui dis merci pour la force et le courage dont il m'a doté pour pouvoir acheminer ce travail à son terme.

Ma gratitude va à l'endroit du Professeur Philémon Zo'o Zame pour avoir accepté d'être mon Directeur de mémoire malgré son emploi de temps charge.

Je remercie le Professeur Paul-Désiré Ndjigui, Chef de Département des Sciences de la Terre, de l'Université de Yaoundé I, pour les savoir connaissances mises à disposition.

Je remercie le Professeur Robert Temdjim, pour sa rigueur scientifique et la qualité des ouvrages qu'il a mis à notre disposition pendant la réalisation de ce travail.

Je dis merci à tous les Enseignants du Département des Sciences de la Terre, pour toutes les connaissances à moi transmises.

Je remercie le Docteur Koah Na Lebogo Serge pour le savoir et le savoir-faire à moi transmis, et le suivi de ce travail.

Aux Aînés Boris Secke, Adrien Djomo et Jacques Claude Ndoumou ; je dis merci pour leur soutien à la fois moral et intellectuel dont ils ont fait preuve.

J'ai une pensée pour tout le personnel de l'ART particulièrement Messieurs Salomon Edjongolo, Mengounda, Haman pour leur soutien et la qualité des ouvrages qu'ils ont mis à notre disposition et, le suivi de ce travail au sein de cette institution.

Ma gratitude va à l'endroit de mes camarades de promotion, spécialement Rostand Ndongo, Tagne Christian, Ngonon Anaba Vital, Ngoh Likaah Solange, Vanina Kenmogne, Yonga Darille, Bopda Talla, Ebode Arnold, Daouchoe Sandrine pour les moments partagés et le soutien moral à moi accordé.

A mes frères, et, sœurs, Francois Bomono, Claude Ngoubissaya, Ruben Bemengue, Destin Tchapou, Leonel Mboueme, Rachel Mbang et les autres je dis merci pour le soutien moral tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	iv
Liste des abréviations, acronymes et sigles	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
RESUME.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I. GENERALITES	3
INTRODUCTION.....	4
I.1 Présentation de la zone d'étude	4
I.1.1 Cadre géographique.....	4
I.1.1.1 Localisation géographique	4
I.1.1.2 Climat	4
I.1.1.3 Géomorphologie.....	7
I.1.1.3.1 Orographie.....	7
I.1.1.3.2. Hydrographie.....	7
I.1.1.4 Végétation	7
I.1.2 Géologie	7
I.1.2.1 Socle	7
I.1.2.2 Sols	8
II. TRAVAUX ANTERIEURS	8
I.2 Paramètre de reconnaissance des sols	8
I.2.1. Sondages pressiométriques.	8
I.2.2 Sondages au pénétromètre dynamique lourd	11
I.2.3 Paramètres physiques et mécaniques	11
CONCLUSION	12
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES.....	13
INTRODUCTION.....	14
I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES	14
II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES D'ANALYSES	
EXPERIMENTALES.....	14
II.1 Méthodes d'acquisition des données de terrain	14
II.1.1 Localisation des points de prélèvement	14
II.1.2 Description des matériaux et essais de reconnaissances.....	14
II.1.2.1 Description des matériaux.....	14
II.1.2.2 Echantillonnage.....	14
II.1.2.3 Identification des échantillons	14
II.1.2.4 Essai de reconnaissance in-situ	14
II.1.2.4.1 Essai au pénétromètre dynamique lourd (PDL).....	14
II.1.2.4.2 Essai au pressiomètre de Menard.....	15
II.1.2.4.3 Sondage carotté.....	16
II.1.2.4.4 Sondage à la tarière manuelle	16
II.1.2.4.5 Sondage par puits manuel	16
II.2 Méthodes d'acquisition des données de laboratoire	16
II.2.1 Travaux géotechniques	16

II.2.1.1 Propriétés physiques	16
II.2.1.1.1 Poids volumique des grains solides	16
II.2.1.1.2 Teneur en eau naturelle	17
CONCLUSION	17
CHAPITRE III. RESULTATS	18
INTRODUCTION	19
III.1 DESCRIPTION DES PROFILS ET RESULTATS DE SONDAGES	19
III.1.1 Sondage Carottés et puits manuels	19
III.1.2 Sondage au pénétromètre dynamique lourd et coupe géologique	23
III.1.3 Sondage pressiométrique et valeur du tassement	23
III.2 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES SOLS DE FONDATION	23
III.2.1 Poids volumique des grains solides	23
III.2.2 Densité apparente	27
III.2.3 Granularité	27
III.2.4 Teneur en eau naturelle	27
CONCLUSION	29
CHAPITRE IV. INTERPRETATION ET ESSAI DE DISCUSSION	30
INTRODUCTION	31
IV.1 COMPORTEMENT DES SOLS DE FONDATION DE LA ZONE D'ETUDE	31
IV.1.1 Paramètres de portance	31
IV.1.2 Pressiomètre de Ménard	31
IV.1.3 Poids volumiques des grains solides	32
IV.1.4 Granularité	33
IV.1.5 Indice de consistance	33
IV.1.6 Teneur en eau	34
IV.1.7 Classification	34
IV.2 Techniques d'amélioration des sols ou solution de fondation	34
CONCLUSION	35
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	36
BIBLIOGRAPHIE	38
ANNEXES	45

LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SIGLES

AFNOR	: Agence Française de Normalisation
CCTP	: Cahier de Clauses Techniques Particulières
GPS	: <i>Global Positioning System</i>
HRB	: <i>Highway Board Reseach</i>
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
NF	: Norme Française
OCR	: <i>Over consolidation ratio</i>
PEI	: Prélèvement de l'Echantillon Intact
RC	: Degré de compressibilité
SC	: Sondage Carotté
SP	: Sondage Pressiométrique
SPDL	: Sondage au Pénétromètre Dynamique Lourd
XF	: Norme Française

:

:

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la zone d'étude (d'après la carte topographique de la zone de Yaoundé, feuille NA-33-XIX au 1/50000, INC- Cameroun)	5
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien (1957) appliqué aux données climatiques de la station météorologique de Yaoundé et ses environs pour la période 2007 – 2017.....	6
Figure 3. Géomorphologie de la zone d'étude (réalisé à partir des images SRTM_u03_n002e010 avec le logiciel Surfer. Source : http://www.glcapp.glc.umd.edu).....	9
Figure 4. Carte géologique de la zone d'étude digitalisés sur les cartes géologiques de Yaoundé). Source : http://www.glcapp.glc.umd.edu).	10
Figure 5. Localisation des points de sondage de la zone d'étude.....	20
Figure 6. Coupes lithologiques des sondages SC1, SC2, SC3	21
Figure 7. Coupes lithologiques des puits manuels	22
Figure 8 . Coupe issue de la corrélation avec la lithologie de base sur la section Nord du sol investigué	22
Figure 9. Coupes lithologiques des sondages Pénétrométriques du SPDL4 et 6 couplés à la coupe lithologique du STM	24
Figure 10. Profil pressiométrique SP1.....	25
Figure 11 Profil pressiométrique SP2.....	26
Figure 12. Profil pressiométrique SP3.....	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données climatiques (2007-2017), d'après la station météorologique de Yaoundé (Mvan)	6
Tableau 2. Résultat de sondage pressiométrique.....	25
Tableau 3. Données récapitulatives des paramètres géotechniques	27
Tableau 4. Récapitulatif des résultats des essais géotechnique	28

RESUME

Le présent travail a pour but de caractériser les matériaux rocheux de la zone de Yaoundé pour une implication dans les travaux de fondation. La méthodologie adoptée a consisté en la réalisation des travaux de terrain et en laboratoire. Les méthodes de terrain utilisées ont consisté en la reconnaissance, la description et le prélèvement intact des échantillons des roches. Les travaux en laboratoire ont porté sur la détermination des propriétés géotechniques. Les résultats obtenus montrent que la zone étudiée est constituée d'un ensemble métamorphique a deux types pétrographiques : gneiss a biotite et grenat et gneiss a grenat et disthène. Les refus des essais pénétrométriques indiquent une profondeur du substratum gneissique comprise entre 5 et 12 m environ. Les valeurs du RQD comprises entre 85 et 90% indiquent une roche de la qualité bonne a excellente. Le module pressiométrique varie entre 0,85 et 15,62 Mpa. La pression de 0,19 à 1,27 Mpa. La teneur en eau varie entre 24,5 et 27,0%. Le coefficient d'absorption d'eau va de 7,93 à 22,18%. La résistance a la compression simple varie entre 95 et 154 Mpa. Ces matériaux rocheux sont peu absorbants (étanches), imperméables, denses et très résistants à la compression. Ils peuvent donc être utilisés comme support de fondation de l'immeuble en construction par rapport à ses caractéristiques physiques et mécaniques.

Mots clés : Géotechnique, Fondation, Matériaux rocheux, Caractérisation.

ABSTRACT

The purpose of this work is to know the soils of the Yaoundé area and to predict their behavior in the foundation works. The methodology adopted consisted of carrying out field and laboratory work. The field methods used consisted in the recognition, description and collection of intact soil samples. Laboratory work focused on the determination of geotechnical properties. The results obtained show that the zone studied is made up of a metamorphic complex with two petrographical types: gneiss with biotite and garnet and gneiss with garnet and kyanite. The refusals of the penetrometer tests indicate a depth of the gneissic substratum between 5 and 12 m approximately. RQD values between 85 and 90% indicate good to excellent rock quality. The pressuremeter module varies between 0.85 and 15.62 Mpa, the limiting pressure from 0.19 to 1.27 Mpa. The water content varies between 24.5 and 27.0%, the water absorption coefficient ranges from 7.93 to 22.18%. Simple compressive strength varies between 95 and 154 Mpa. These rocky materials are not very absorbent (watertight), impermeable, dense and very resistant to compression. They can therefore be used as a foundation support for the building under construction in relation to its physical and mechanical characteristics.

Keywords: Geotechnics, Foundation, Rock materials, characterization.

INTRODUCTION GENERALE

Les fondations d'ouvrages sur les sols, qu'elles soient superficielles ou profondes, font l'objet d'études depuis très longtemps et sont maintenant régies par des règles de calcul validées sur de nombreux sites. (Xavier, 1997). Dans le domaine rocheux a prévalu jusqu' à ces dernières années, l'idée qu'il n'y avait guère de problème de tassement ou de stabilité, sauf pour des appuis sur versant pouvant glisser sur un plan a pendage aval. La majorité des roches saines ayant une résistance suffisamment élevée, le dimensionnement des fondations d'ouvrages était limité par la résistance au béton plutôt que par celle de la roche. Mais l'augmentation des charges apportées par les fondations de centrales nucléaires, ou de viaducs à grande portée, a conduit à accorder une plus grande attention aux fondations sur massifs rocheux, et à vérifier notamment que les critères de stabilités, de tassements différentiels et de charges limites admissibles étaient satisfaits.

Les masses rocheuses servant d'assise de fondation pour ces types d'ouvrages n'en demeurent pas moins le siège de plusieurs problèmes tels que la présence des terrains fractures et cisailles, des joints ou lits rocheux à pendage problématique, des affaissements dus au détachement des de roches très souvent à l'origine de leur rupture plus ou moins importante a court et long terme. De La présente étude se donnait donc pour but de caractériser et d'évaluer la qualité des matériaux rocheux servant d'assise de fondation.

Les objectifs spécifiques sont :

- déterminer la nature, le degré de fracturation et la profondeur du toit du substratum rocheux ;
- déterminer les propriétés géotechniques des matériaux rocheux ;
- vérifier si ces matériaux sont de bonne qualités pour être utilisés comme assise de fondation.

Le présent mémoire de master, après l'introduction générale, comprend quatre chapitres :

- le premier chapitre, 'Généralités', porte sur le milieu naturel de l'étude et les travaux antérieurs sur la géotechnique ;
- le deuxième chapitre, 'Matériels et méthodes' présente les travaux réalisés sur le terrain et en laboratoire ;
- le troisième chapitre 'Résultats', présente les principaux faits d'observation et d'analyses géotechnique ;
- le quatrième chapitre 'Interprétation et discussion', précise leur comportement pour servir d'assise de fondation des ouvrages.

Enfin, la conclusion générale fait ressortir les principaux résultats obtenus au cours de ce travail, ainsi que les principales perspectives.

CHAPITRE I. GENERALITES

INTRODUCTION

Le présent chapitre définit le cadre géographique et présente les données climatiques et hydrographiques de la zone d'étude. Il s'achève par une revue des travaux antérieurs complémentaires au terme étudié.

I.1 Présentation de la zone d'étude

I.1.1 Cadre géographique

I.1.1.1 Localisation géographique

Sur le plan administratif, la zone d'étude est située dans la Région du Centre, Département du Mfoundi, Arrondissement de Yaoundé 1, précisément en face du bâtiment abritant l'hôtel Hilton, sur le pignon gauche de l'immeuble du crédit foncier. La zone d'étude s'étend entre 03°52'48'' et 03°51'36'' de latitude Nord, et entre 11°30'00'' et 11°31'12'' de longitude Est (Fig. 1).

I.1.1.2 Climat

Le climat de la zone d'étude est caractérisé par les relevés météorologiques de la station de Mvan. Pour la période allant de 2007 à 2017, la moyenne des précipitations est de 1586,5 mm (Tab. 1). Les températures oscillent entre 22,8 et 25,4°C pour une moyenne de 23,9°C (Tab. 1). Les températures les plus élevées s'observent aux mois de mars et avril et, les plus faibles en juillet et août. La zone d'étude est soumise à un climat de type subéquatorial classique à 02 saisons de pluie et 02 saisons sèches. Ces quatre saisons sont inégalement réparties dans l'année (Ndam *et al.*, 1998). Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) établi à partir des données pluviométriques et thermiques de la zone d'étude permet de distinguer quatre saisons (Fig. 2) :

- une grande saison sèche de décembre à février ;
- une petite saison de pluies de mars à juin ;
- une petite saison sèche de juillet à août ;
- une grande saison de pluies de septembre à novembre.

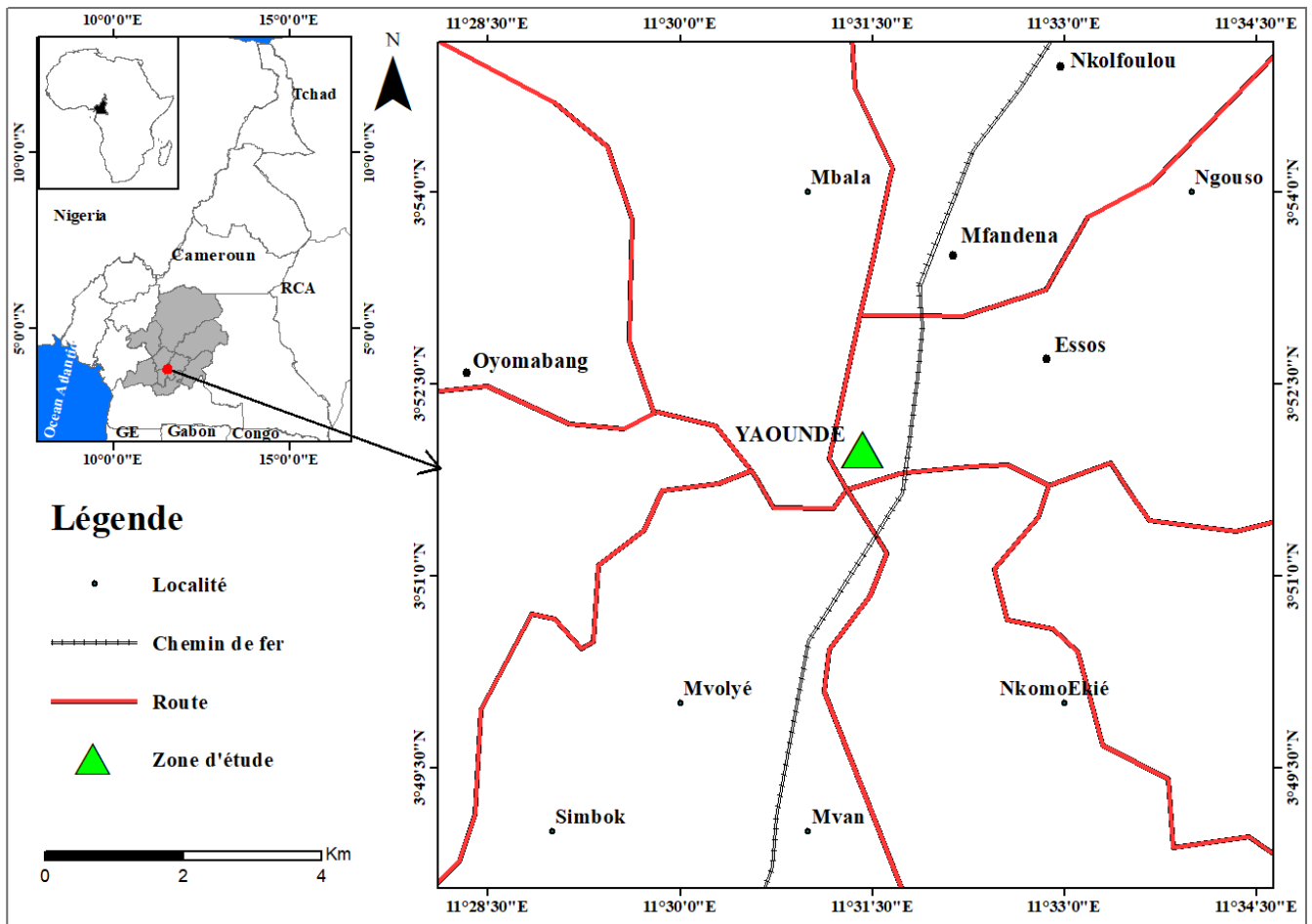


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (d'après la carte topographique de la zone de Yaoundé, feuille NA-33-XIX au 1/50000, INC- Cameroun)

Tableau 1. Données climatiques (2007-2017), d’après la station météorologique de Yaoundé (Mvan)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy	Total
P (mm)	19,1	53,4	139	187	207,6	156,3	75	98,8	233,1	283,9	119	22,4		1586,5
T (°C)	24,6	25,4	25,1	24,7	24,3	23,5	22,8	22,8	23,3	23,4	23,9	24	23,9	

P (mm) : Précipitations moyennes en mm, T (°C) : Températures moyennes en °C, Moy : Moyenne interannuelle

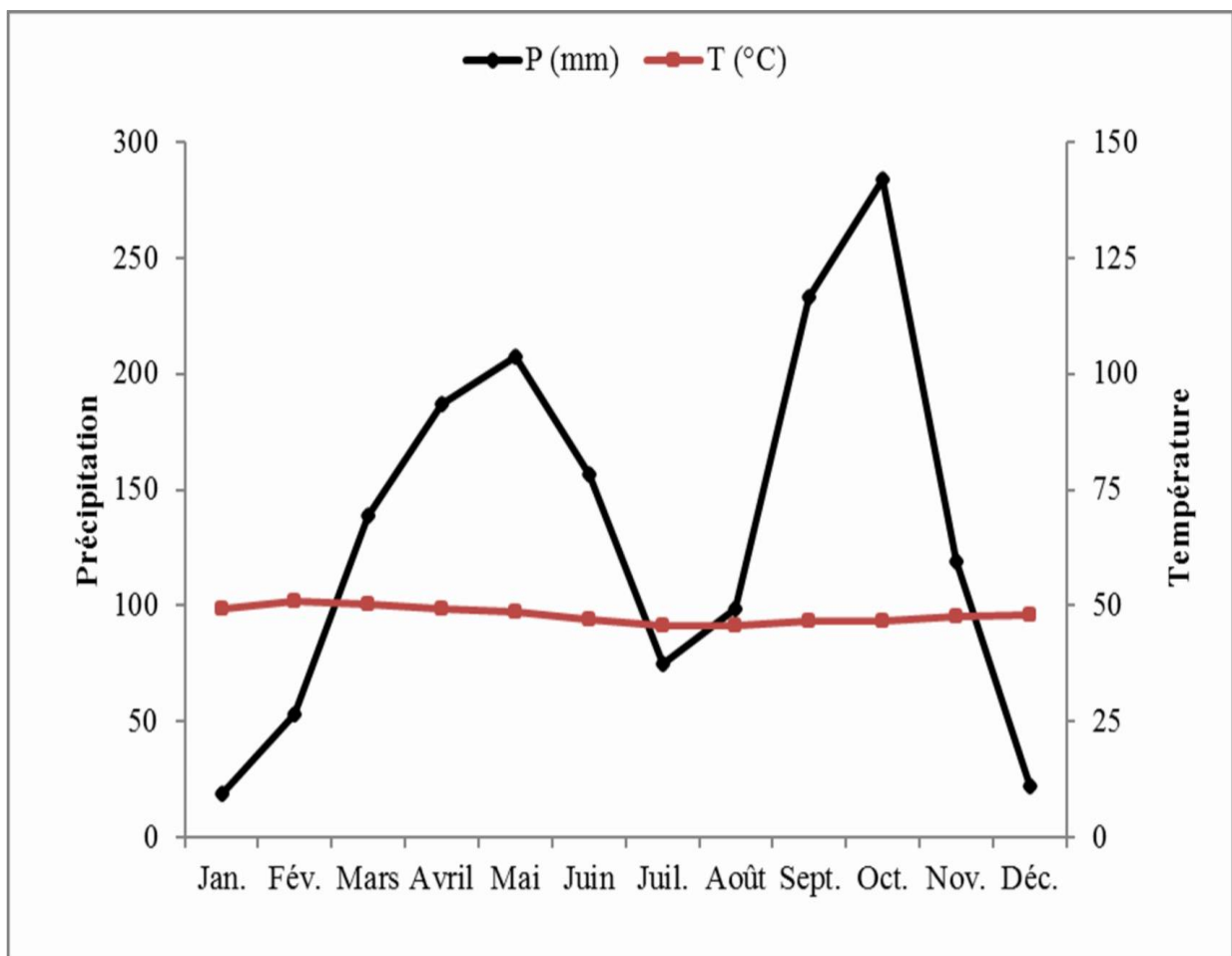


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données climatiques de la station météorologique de Yaoundé et ses environs pour la période 2007 – 2017.

I.1.1.3 Géomorphologie

I.1.1.3.1 Orographie

La zone d'étude fait partie du Plateau Sud camerounais. Il s'agit d'une vaste surface mollement ondulée, dont l'altitude moyenne est comprise entre 600 et 1200 mètres (Vallerie, 1995). Le modelé de la région de Yaoundé à laquelle appartient la zone d'étude est constituée de trois grandes unités géomorphologiques (Fig. 3).

- l'unité d'altitude < 600 m correspond à des zones d'accumulation. Elle est constituée d'interfluves séparés par de larges vallées marécageuses. Elle occupe la partie NE de la surface topographique de la zone d'étude ;
- l'unité d'altitude comprise entre 600 m et 700 m correspond à des bas plateaux et des vallées abritant très souvent les marécages et des cours d'eau ;
- l'unité d'altitude >700 m correspond à des hauts plateaux correspondant aux formes montagneuses, elle occupe la partie NW de la zone d'étude.

I.1.1.3.2. Hydrographie

La zone d'étude se localise dans le bassin du Mfoundi avec pour principal cours d'eau le Mfoundi (Fig. 4). Le réseau hydrographique est de type dendritique. Le cours du Mfoundi est caractérisé dans ce secteur par un relief mou et de pentes très faibles. Ses eaux sont gonflées par celles de ses affluents Angaa et Abie en rive gauche de la Mefou (Olivry, 1986) (Fig.4). Le Mfoundi, dans la zone d'étude, coule au sein d'une vaste et très large vallée marécageuse, où son lit est envahi par des infrastructures et autres superstructures.

I.1.1.4 Végétation

La végétation de la zone de Yaoundé est dominée par une forêt secondaire (Letouzey, 1985). Cette dernière a subi d'importantes dégradations liées à l'activité anthropique. Ces modifications ont abouti à la disparition des formations végétales de la forêt primaire qui sont remplacées notamment par l'architecture du bâtiment et l'accroissement de l'urbanisation.

I.1.2 Géologie

I.1.2.1 Socle

Les roches identifiables dans la zone d'étude sont des roches métamorphiques (Fig. 4). Il s'agit notamment des migmatitiques à biotite et amphiboles, des micashistes grénatifères à deux micas et des gneiss supérieurs grénatifères à deux micas. Ce substratum de la zone d'étude appartient à la série de Yaoundé (Bessoles et Trompette, 1980). Les affleurements de la zone de Yaoundé sont constitués d'un principal groupe lithologique : les ensembles migmatitiques

comportant les gneiss à grenat, les micaschistes grénatifères à deux micas, amphibole alternant fréquemment avec des lits millimétriques voir des bancs de quartzites donnant l'aspect d'un rubanement micaschistes grénatifères à deux micas, et des gneiss supérieurs grénatifère à deux micas. (Bessoles et Trompette, 1980 ; Regnault, 1986 ; Olinga, 2003 ; Mvondo, 2003 ; Olinga *et al.*, 2010).

I.1.2.2 Sols

Les études réalisées dans le Centre Cameroun permettent de dénombrer deux types de sols dans la zone d'étude. Il s'agit des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes (Yongue, 1986 ; Vallerie, 1995 ; Santoir et Villiers, 1995 ; Ndjigui *et al.*, 2013). Les sols ferrallitiques rencontrés sont des sols désaturés typiques rouges. Ces sols fortement désaturés en bases sont rencontrés sur les pénéplaines tandis que les sols faiblement désaturés en bases apparaissent dans les bas-fonds marécageux (Ekodeck, 1984). Ces deux groupes sont séparés par des sols de transition moyennement désaturés en base. Les sols hydromorphes sont caractérisés par la présence temporaire ou permanente d'un excès d'eau dans une partie ou dans la totalité des horizons (Ekodeck, 1984). La texture de ces sols est le plus souvent sableuse, limono-argileuse, et sablo-argileuses. Elle devient argilo-sableuse en profondeur (Vallerie, 1995).

II. TRAVAUX ANTERIEURS

I.2 Paramètre de reconnaissance des sols

I.2.1. Sondages pressiométriques.

Les argiles issues des formations de la ville d'El-kseur en Algérie présentent des valeurs de module pressiométrique variant entre 2 et 317 bars soit 0,2 et 31,7 MPa, Pour ces formations la pression limite oscille entre 0,1 et 3,32 MPa (Sadaoui, 2008). Les valeurs de ce ces paramètres sur les argiles normalement consolidées à Tabéssa (Algérie) oscillent entre 7,82 et 13,30 MPa pour E avec une presssion limite (Pl) comprise entre 1,09 et 1,9 MPa (Fathallah *et al.*, 2016). Pour les argiles développées sur roches plutoniques la valeur du module pressiométrique est comprise entre 0,43 et 4,34 MPa soit 4,3 et 43,4 bars avec des pressions limites oscillant entre 0,18 et 0,98 MPa (Manou, 2018). Les argiles développées sur Les gneiss et les chloritoschistes présentent les valeurs de ce paramètre variant de 0,073 à 9,67 MPa et une pression limite allant de 0,0025 à 0,301 MPa (Fankem, 2021).

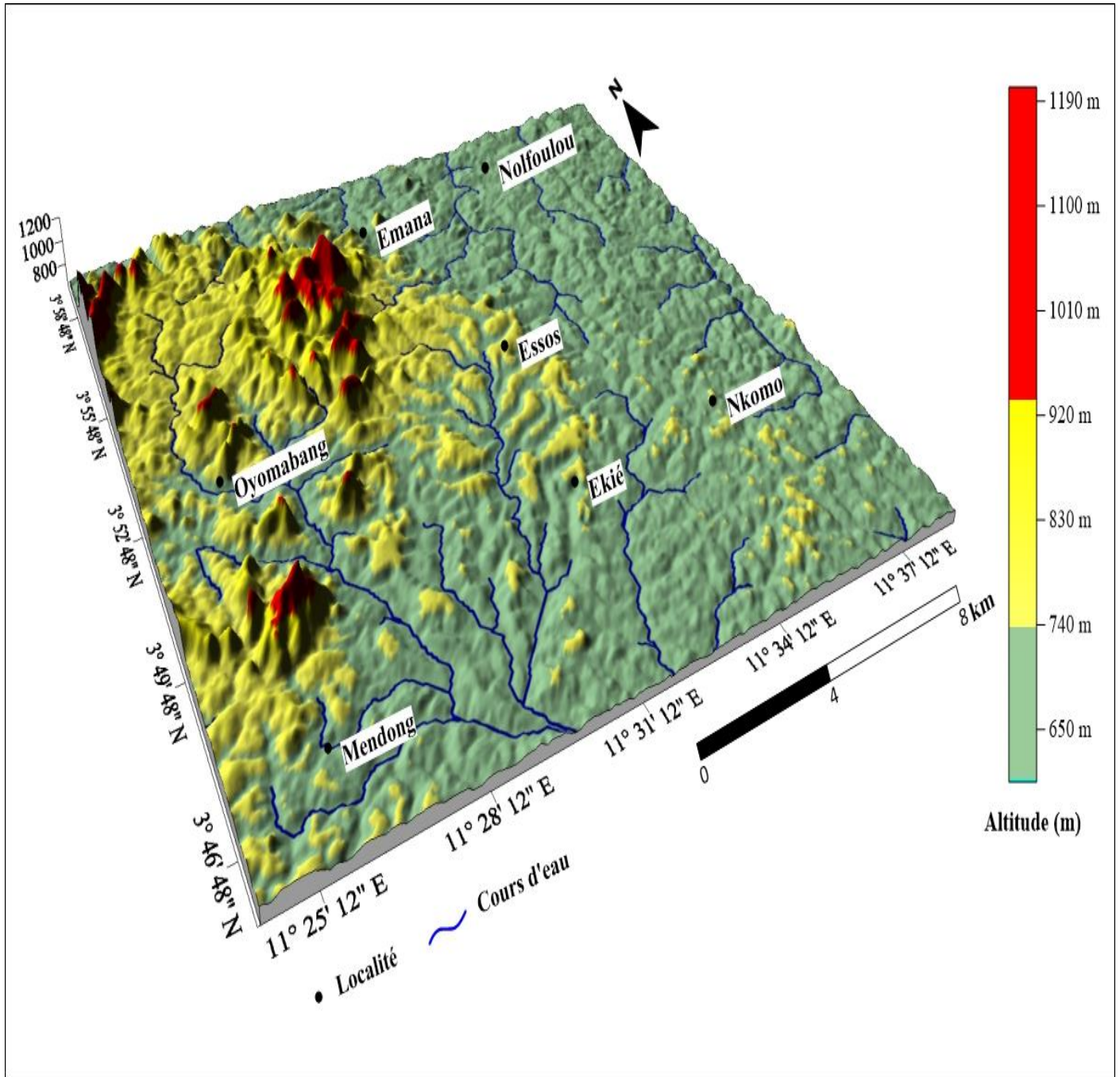


Figure 3. Géomorphologie de la zone d'étude (réalisé à partir des images SRTM_u03_n002e010 avec le logiciel Surfer. Source : <http://www.glcapp.glcapp.umd.edu>).

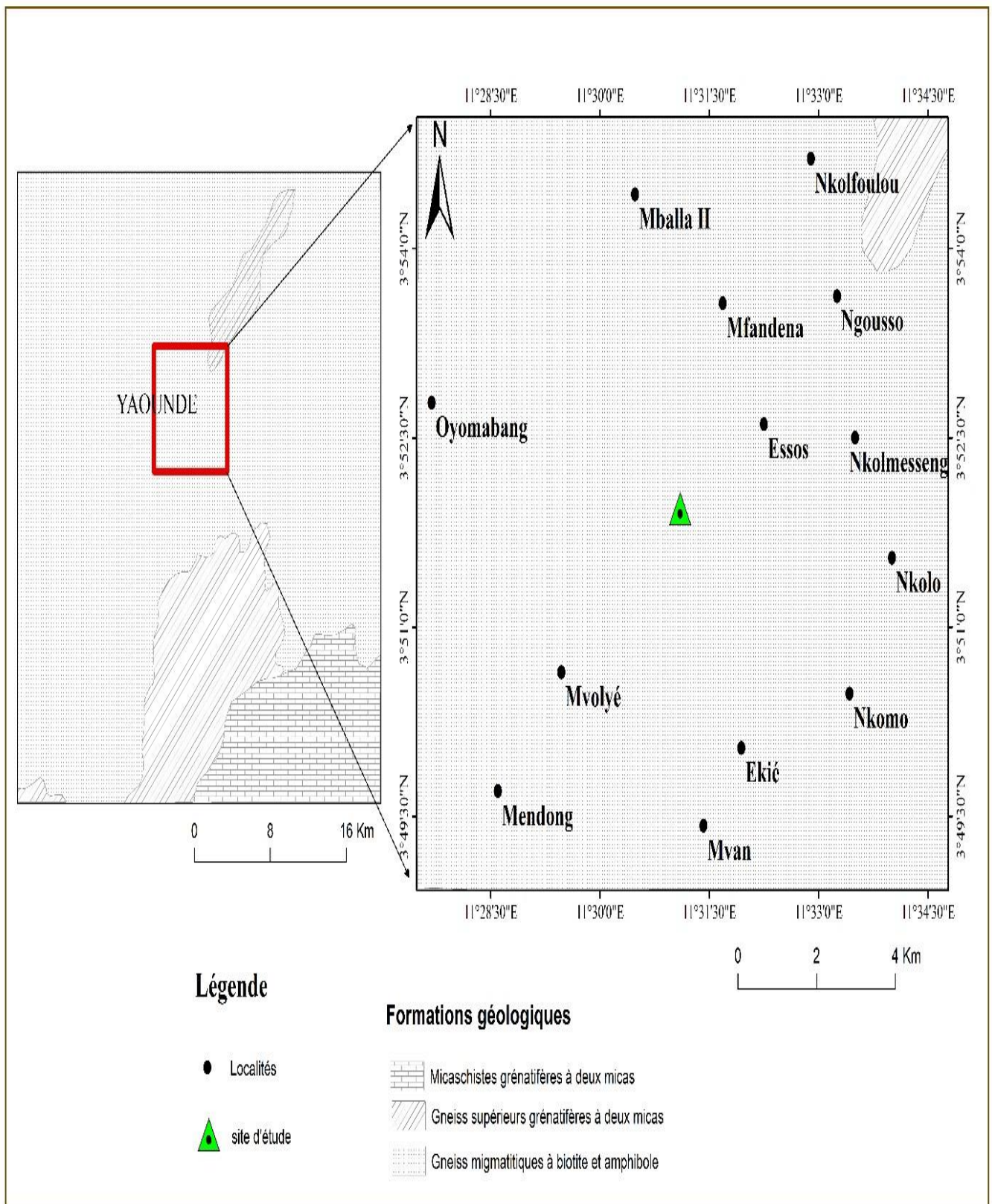


Figure 4. Carte géologique de la zone d'étude digitalisés sur les cartes géologiques de Yaoundé). Source : <http://www.glcapp.glcf.umd.edu>).

I.2.2 Sondages au pénétromètre dynamique lourd

Les argiles issues des formations de la ville d'El-kseur en Algérie présentent des valeurs avec une résistance en pointe (RQD) qui varie de 12 à 36 bars (Sadaoui, 2008).

Les valeurs de ce paramètre oscillent entre 1 et 18,5 bars sur argiles issues sur roches plutoniques (Manou, 2018 ; Manfo, 2020). Pour les argiles issues des formations de Bertoua la valeur de ce paramètre varie entre 8 et 146 bars (Nzabakurikiza *et al.*, 2017). Les argiles développées sur Les gneiss et les chloritoschistes présentent les valeurs de contraintes admissibles variant entre 1,5 à 4 bars (Fankem, 2021).

I.2.3 Paramètres physiques et mécaniques

La variation des valeurs de poids volumique des grains solides est fonction de la roche parentale (Manou, 2018). Les argiles développées sur micaschiste possèdent des valeurs de poids volumique des grains solides comprises entre 2,62 et 2,73 gf/cm³ (Tchakam, 2011). Les argiles développées sur migmatite possèdent des valeurs de poids volumique des grains solides comprises entre 2,65 et 2,78 gf/cm³ (Ekodeck, 1984 ; Bella, 2011). Les moyennes respectives de ce paramètre sont 2,68 gf/cm³ et 2,72 gf/cm³. Les argiles développées sur Chloritoschiste présentent une valeur moyenne de poids volumique des grains solides de 2,64 gf/cm³ (Onana, 2002). Les argiles développées sur gneiss présentent de valeurs de poids volumique des grains solides oscillant entre 2,37 et 2,82 gf/cm³, pour une valeur moyenne de 2,60 gf/cm³ (Benkon, 2011 ; Ngami 2012). Les valeurs de ce paramètre varient entre 2,25 et 2,82 gf/cm³ soit une valeur moyenne de 2,54 gf/cm³ pour les argiles dérivées des roches plutoniques (Wongolo, 2011; Manou, 2018). Les argiles issues de l'altération des basaltes présentent une valeur moyenne de poids volumique de grains solide de 2,93 gf/cm³ (Ngami, 2012).

2014). Les argiles développées sur roches plutoniques présentent en moyenne 0,245 pour ce paramètre pour des valeurs comprises entre 0,165 et 0,325 (Wongolo, 2011; Nwankwoala *et al.*, 2014 ; Manou, 2018). Les argiles développées sur gneiss présentent des valeurs de contrainte effective (σ'_{vo}) comprises entre 0,0174 et 0,305 bar soit une moyenne de 0,161 bar (Ngami, 2012 Bekon, 2011). Les valeurs de contrainte effective pour les argiles développées sur micaschistes donnent en moyenne de 64,8 bars (Tchakam, 2011). Les argiles développées sur roches plutoniques présentent la valeur moyenne de ce paramètre de 0,189 bar pour des valeurs comprises entre 0,03 et 0,348 bar (Wongolo, 2011; Nwankwoala *et al.*, 2014 ; Manou, 2018). La valeur de la contrainte effective s'étale entre 0,486 et 0,124 bar soit en moyenne de 0,305 bar pour Les argiles développées sur recouvrements basaltiques (Ngami, 2012).

Les valeurs argiles sur gneiss présentent les valeurs de degré de compressibilité (R) des comprises entre 0,166 et 5,61 bar pour une moyenne de 2,89 bars (Ngami, 2012 Bekon, 2011). Pour les argiles latéritiques sur micaschistes, les valeurs moyennes de degré de compressibilité sont de 0,087 bar (Tchakam, 2011). Les argiles développées sur roches plutoniques, les valeurs de degré de compressibilité varient entre 0,021 et 0,219 soit une moyenne de 0,12 (Wongolo, 2011 ; Nwankwoala *et al.*, 2014 ; Manou, 2018 ;). Les argiles développées sur recouvrements basaltiques présentent des valeurs de degrés de compressibilité des argiles sur recouvrements basaltiques de 0,107 à 7,73 pour une valeur moyenne de 3,918 (Ngami, 2012).

CONCLUSION

La zone d'étude s'étend entre 03°52'48'' et 03°51'36'' de latitude Nord, et entre 11°30'00'' et 11°31'12'' de longitude Est. Elle est soumise à un climat de type équatorial classique à 02 saisons de pluies et 02 saisons sèches inégalement réparties au cours de l'année. Ce qui est à l'origine de la végétation dominée par une forêt secondaire (Letouzey, 1985). Cette dernière a subi d'importantes dégradations liées à l'activité anthropique. La topographie actuelle du site montre que le projet est sur un terrain en pente avec des mouvements de terre. Le réseau hydrographique de la région est de type dendritique avec pour principal cours d'eau le Mfoundi. Son substratum d'âge archéen et affecté par l'orogénèse panafricaine, est constitué de roches métamorphiques à l'instar des gneiss sur lesquels se développent des sols ferrallitiques. Afin de mieux aborder l'étude et mieux cerner ses contours, le matériel et la méthode utilisés sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

INTRODUCTION

Le présent chapitre vise à ressortir les différents matériels et méthodes employés respectivement lors des travaux de terrain et de ceux de laboratoire.

I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES

L'approche initiale de cette étude a consisté à faire une synthèse des connaissances géologiques, géotechniques et hydrogéologiques de la région. Elle s'est faite par l'examen des thèses, des publications, des mémoires et les rapports géotechniques.

II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES

II.1 Méthodes d'acquisition des données de terrain

II.1.1 Localisation des points de prélèvement

Les points de prélèvements sont des points de sondages de la zone d'étude (fig. 5). Le matériel utilisé pour la localisation est un appareil récepteur GPS et une carte topographique de la zone de Yaoundé au 1/500000.

II.1.2 Description des matériaux et essais de reconnaissances

II.1.2.1 Description des matériaux

La description des matériaux dans les profils d'altération s'est faite du bas vers le haut. Elle a consisté à l'identification des différents matériaux et des matériaux présents. Les critères de description sont la couleur, la texture, la structure et en fin la limite entre les différents niveaux observés.

II.1.2.2 Echantillonnage

Le prélèvement des échantillons a été fait à l'aide de pelles, pioches et du sondage carotté. 5 échantillons intacts de sol ont été récoltés aux fins des essais mécaniques.

II.1.2.3 Identification des échantillons

L'encodage des échantillons a été effectué à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée est constituée de SC 1-PEI N °1 désigne un matériau obtenu au sondage carotté, prélèvement de l'échantillon intact.

II.1.2.4 Essai de reconnaissance in-situ

II.1.2.4.1 Essai au pénétromètre dynamique lourd (PDL)

L'essai au pénétromètre dynamique Lourd a été réalisé selon la norme NF P 94-115 (AFNOR, 1990). Cet essai est un sondage géotechnique fournissant les caractéristiques d'un sol. (Pallier, 2007). Il permet de :

- apprécier de façon qualitative la résistance des terrains traversés ;

- déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol ;
- effectuer les contrôles de compactage.

Les essais de pénétration dynamique consistent à enfoncer dans le sol, par battage à l'aide d'un mouton normalisé et de manière quasi – continue, un train de tiges muni à son extrémité d'une pointe débordante de section également normalisée. Le nombre de coups de mouton correspondant à un enfoncement donné est noté au fur et à mesure de la pénétration de la pointe dans le sol. Cet essai permet d'obtenir la résistance dynamique de pointe RQ_d et d'apprécier son évolution dans les différentes couches de sols en place. Les essais réalisés donnent le profil de résistances obtenues par la formule des hollandais.

$$RQ_d = \left(N \cdot M^2 \cdot \frac{H}{A} \right) \cdot \left(\frac{1}{e} \right) \cdot \left(\frac{1}{P_0 + n \cdot t} \right) \text{ Avec}$$

- RQ_d : Résistance dynamique en pointe ;
- M : Masse du mouton ; 63,5kg
- P_0 : Masse passive initiale (masse du mouton+ masse tige guide + masse enclume);91.62 Kg.
- t : Masse d'une tige ; 7.18 kg
- H : Hauteur de chute ; 75cm
- n : Nombre de tiges enfouies dans le sol (nombre de tiges) ; e : Enfoncement permanent du pieux pour un nombre de coups de mouton ; 20 cm
- N : Nombre de coup pour l'enfoncement (e) ;
- A : Section de la pointe 20cm²

II.1.2.4.2 Essai au pressiomètre de Menard

L'essai pressiométrique a été réalisé conformément à la norme NF P 94-110 (AFNOR, 2000). C'est un essai de chargement in-situ réalisé dans un forage exécuté préalablement. Il permet de mesurer les caractéristiques mécaniques du sol (pression limite et module préssiométrique) nécessaires à la détermination de la contrainte admissible du sol et le calcul des tassements engendrés. L'essai consiste à descendre à une profondeur donnée, une sonde cylindrique gonflable dans un forage soigneusement calibré. Les variations du volume du sol au contact de la sonde sont mesurées en fonction de la pression radiale appliquée. L'essai se réalise par palier de 1 m éventuellement. La distance doit être supérieure à 0,75 m. les résultats obtenus permettent de tracer la courbe brute avec les informations de volume à 60 s. lesquelles sont : la pression et le volume. Les caractéristiques suivantes d'un sol sont déduites : le module préssiométrique (E) et la pression limite (Pl). Un critère de qualité très souvent utilisé

par la norme française est le rapport E/Pl qui permet une classification des sols (Fathallah *et al.*, 2016).

II.1.2.4.3 Sondage carotté

Le sondage carotté est exécuté selon la méthodologie et les procédures de la norme française XP 94-202 (AFNOR, 1995). Cet essai permet outre l'identification visuelle des couches de sol traversées, le prélèvement des échantillons intacts de sol meuble sur lesquels seront réalisés des essais de laboratoire.

II.1.2.4.4 Sondage à la tarière manuelle

Le sondage à la tarière manuelle est exécuté selon la méthodologie et les procédures de la norme française XP 94-202 (AFNOR, 1995). Son principe consiste à visser dans le sol une sorte de cuillère coupante qui découpe le sol et s'enfonce au fur et à mesure des rotations manuelles. Deux (02) sondages à la tarière manuelle (STM) sur le site ont été réalisés au droit des SPDL 4 et SPDL 6 à une profondeur de 2.00 m partant de la surface libre du sol. Lorsque la cuillère coupante est pleine, on la ramène en surface et on fait une observation visuelle ou un prélèvement du sol en profondeur. La tarière est constituée d'un ensemble de tige d'un mètre de longueur que l'on peut rallonger au fur et à mesure de l'avancement du forage. Les échantillons remontés permettent la description des sols recoupés et l'établissement d'une coupe lithologique des horizons traversés.

II.1.2.4.5 Sondage par puits manuel

Dans les zones à sonder par puits manuels, des tranchées de section 0,60*1.00 m, dont les profondeurs ont été dimensionnées pour aller à 1.00 m en dessous de la ligne rouge sur la plate-forme, ont été réalisées à l'aide des pioches, pelles et barres à mines. De ces différents puits sont prélevés des échantillons destinés à des essais de laboratoire, accompagnés des coupes lithologiques des sols rencontrés.

II.2 Méthodes d'acquisition des données de laboratoire

II.2.1 Travaux géotechniques

Les essais géotechniques ont été réalisés au Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE). La réalisation des travaux de laboratoire a été faite sur les échantillons de carotte de sols intacts. Ces dernières ont fait l'objet d'une observation géotechnique.

II.2.1.1 Propriétés physiques

II.2.1.1.1 Poids volumique des grains solides

Le poids volumique des grains solides a été déterminé par la méthode au psychomètre. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-054 (AFNOR, 1991).

Ainsi l'indice de plasticité I_p donne une indication sur l'étendue du domaine plastique (Soukatchoff, 2010). En ordre de grandeur, les sols peuvent être identifiés suivant les valeurs de I_p ; L'indice de plasticité permet aussi de déterminer le degré d'argilosité d'un sol (Lerau, 2006) . L'indice de consistance I_c est définie par la relation $I_c = (W_l - W) / I_p$. Cet indice renseigne sur la consistance du sol.

II.2.1.1.2 Teneur en eau naturelle

La teneur en eau a été déterminé par référence à la norme NF P94-050 (AFNOR, 1995) C'est un essai qui permet de mesurer la quantité d'eau contenue dans une roche à l'état naturel. Il consiste à sécher un matériau de masse humide m_h connue pendant 24h à l'étuve et à mesurer la masse sèche m_d de ce dernier pour déterminer la quantité d'eau contenue dans le matériau W .

CONCLUSION

La méthodologie employée dans cette présente étude a consisté en un recensement systématique et à la collecte des données dans plusieurs articles, rapports et thèses, à la localisation des sites de construction. À la suite les différents matériaux ont fait l'objet de plusieurs prélèvements et caractérisation géotechnique appropriée pour leur implication en travaux de fondation. Les résultats obtenus au cours de ces manipulations de terrain et de laboratoire sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III. RESULTATS

INTRODUCTION

Le présent chapitre est un récapitulatif des différents résultats obtenus lors des investigations sur le terrain et des essais effectués en laboratoire. Ces essais ainsi que l'exploitation des méthodes analytiques utilisées ont abouti à des résultats qui sont présentés dans cette partie.

III.1 DESCRIPTION DES PROFILS ET RESULTATS DE SONDAGES

III.1.1 Sondage Carottés et puits manuels

Les échantillons de sol ont été prélevés à des positions topographiques différentes (Fig. 5) trois points de sondage ont été retenus. La séquence obtenue est composée du bas vers le haut de (Fig. 5) :

- Roche saine (gneiss) d'épaisseur variable de couleur gris clair, de texture massive, composés macroscopiquement de feldspaths, quartz, pyroxène, hornblende. La profondeur de sondage de la roche variait entre 3 et 3,50 m dans les trois points de sondage SC.
- L'isaltérite constitué de roches altérées en argile jaunâtre (5YR 5/4) pour SC3 et SC2, bariolée et rougeâtre (5YR 5/6) pour SC 3 d'épaisseur 1 à 4 m ;
- Le niveau argileux meuble d'épaisseur allant de 4 à 9 m, constituer d'argiles, de couleur rougeâtre (5YR 5/6) pour SC 2 et SC 3 et bariolée pour SC 1. Sa structure est grumeleuse, présence de nodules d'échelles millimétriques à centimétriques donnant une texture sablo-argileuse. La macroporosité est visible et mise en place par la pédofaune et les racines.

Deux puits manuels (Fig. 5) sont effectués sur les lots étudiés. Ils présentent des profils pédologiques à plusieurs horizons et variant d'une profondeur à une autre. Ces puits révèlent l'existence d'un sous-sol constitué essentiellement, sous une couche de blocs (matériaux d'apport), des argiles de couleurs variantes. Le niveau de la nappe phréatique n'a pas été identifié dans ces puits.

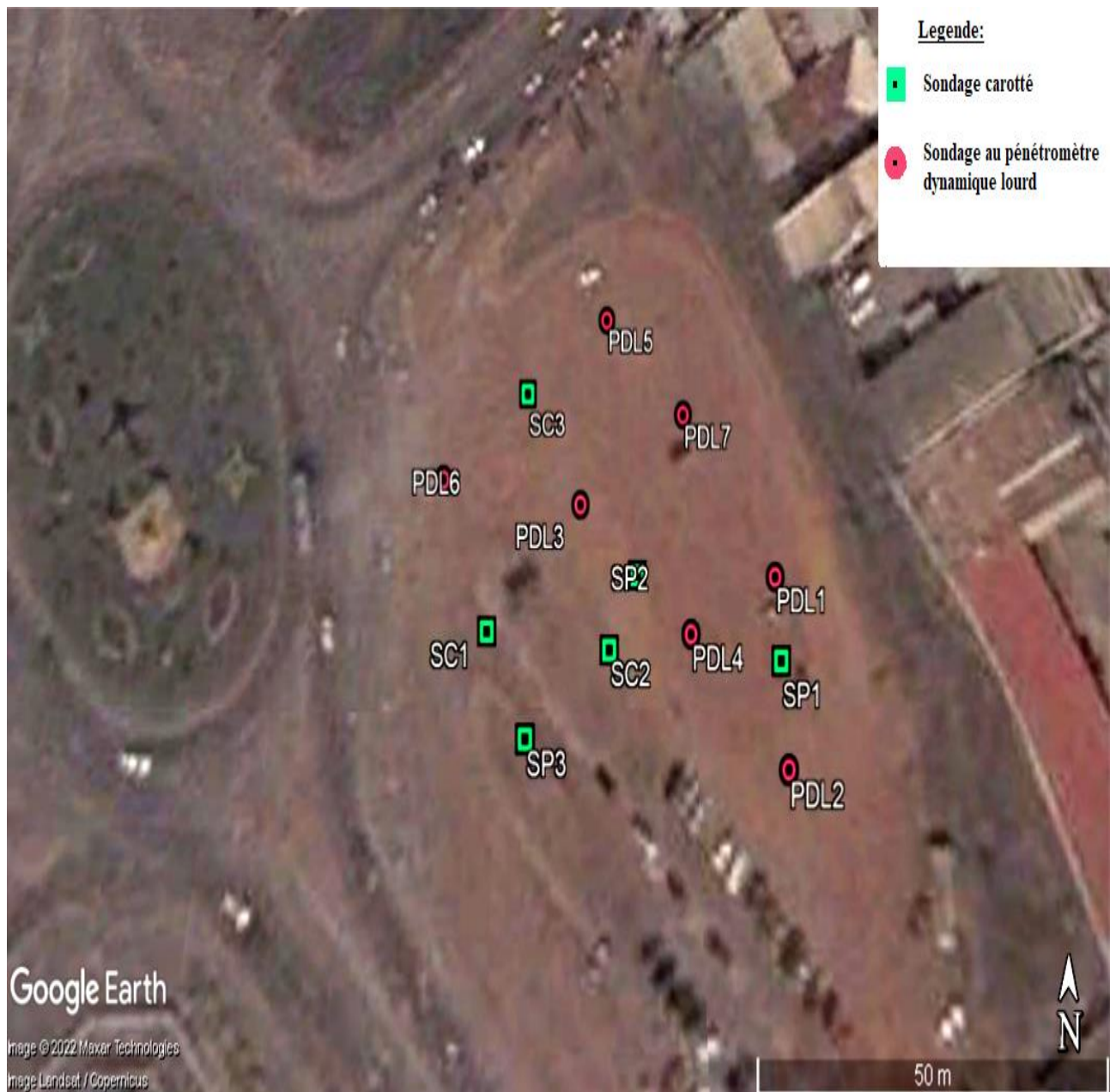


Figure 5. Localisation des points de sondage de la zone d'étude

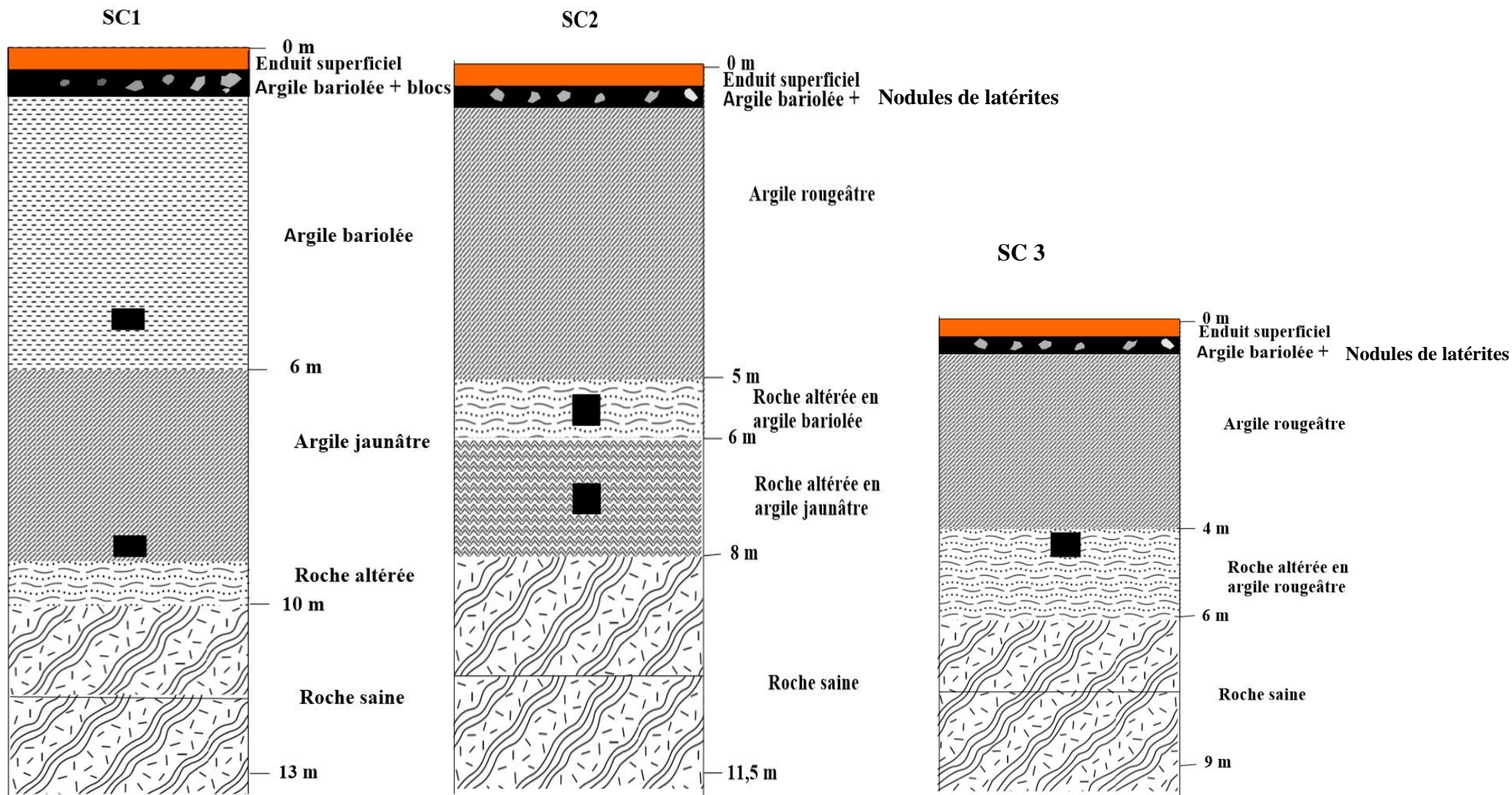


Figure 6. Coupes lithologiques des sondages SC1, SC2, SC3

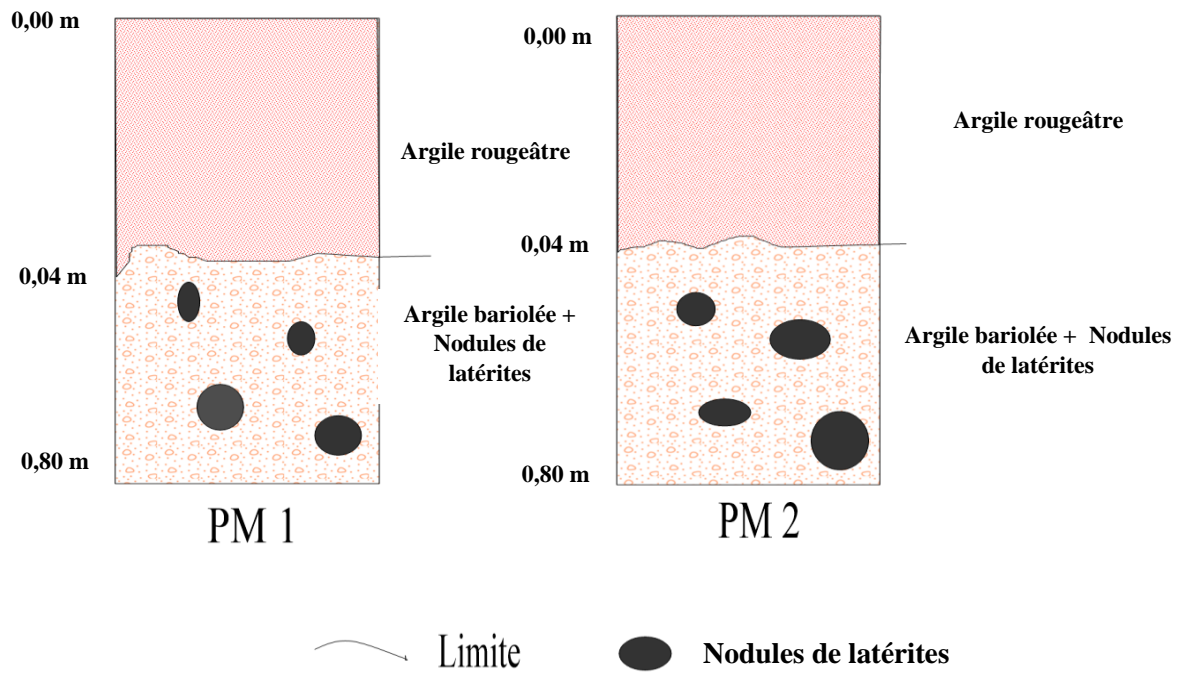


Figure 7. Coupes lithologiques des puits manuels

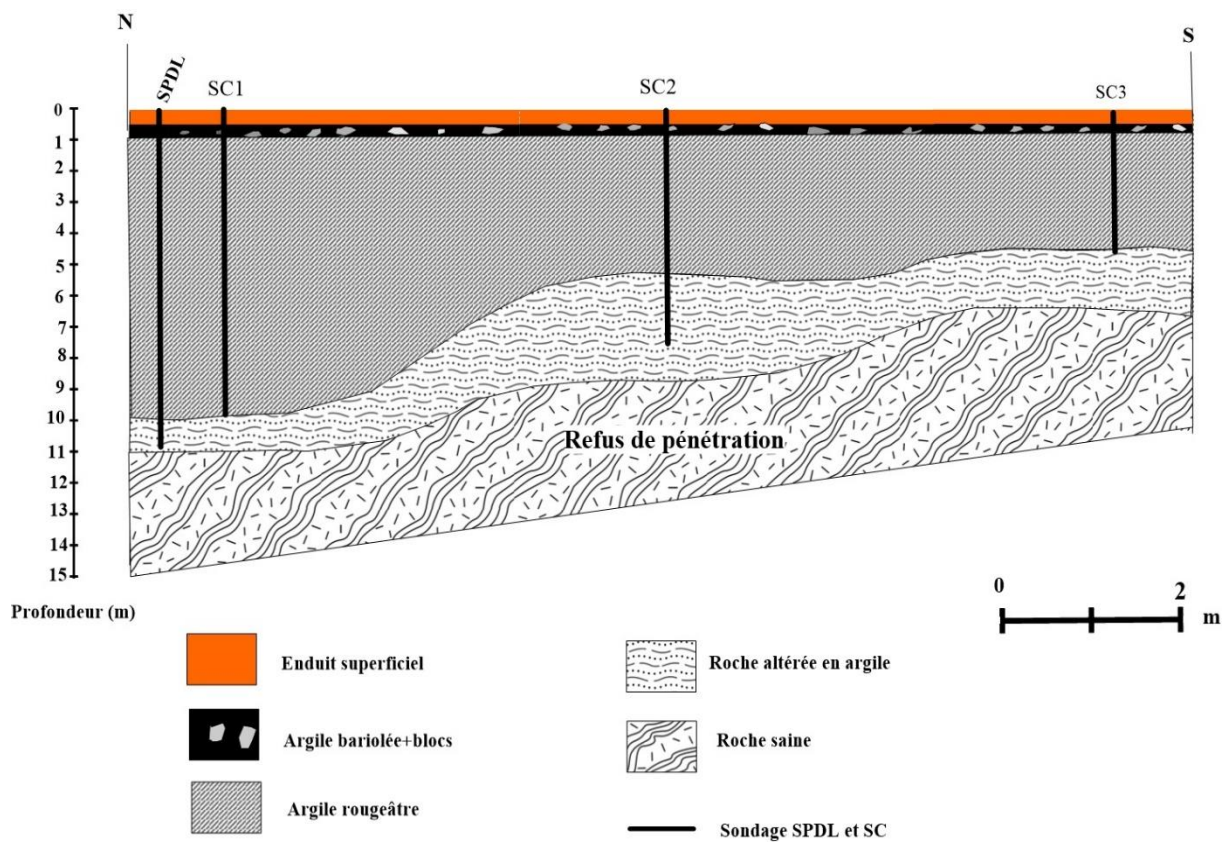


Figure 8. Coupe issue de la corrélation avec la lithologie de base sur la section Nord du sol investigué

III.1.2 Sondage au pénétromètre dynamique lourd et coupe géologique

Les courbes pénétrométriques issues des sondages de la zone d'étude sont représentés en figure 8 et en Annexe. L'exploitation de ces courbes montre que les sols (argiles) de la zone d'étude présentent les valeurs de résistance dynamique de pointe (RQd) varient de 7 à 300 kg/cm² pour une moyenne de 153,5 kg/cm². Les valeurs correspondantes de contrainte admissible Qad oscillent entre 0,4 à 16,7 MPa pour une moyenne de 8,55 MPa.

SPDL 4 / STM1 : le profil a une épaisseur de 2 m et est constitué de 2 horizons. La base est composée d'argile rougeâtre sur laquelle repose les argiles latéritiques rougeâtre (2,5 YR 4/6) ;

SPDL6 / STM2 : c'est un profil à une épaisseur de 2 m de profondeur. Il est constitué de 2 horizons. On retrouve une argile bariolée de couleur dominante rouge (2,5 YR 3/6) et jaune (2,5YR 5/8) à la base sur laquelle repose l'argile latéritique rougeâtre (2,5 YR 4/6)

La coupe géologique est obtenue à partir des logs lithologiques généraux des sondages au pénétromètre dynamique lourd (SPDL) et au sondage carotté (SC). Cette coupe est très utile pour identifier la nature du sol impliqué dans les travaux de fondation. L'analyse des colonnes lithologiques et la coupe géotechnique montrent une hétérogénéité du sol investigué en fonction de la profondeur jusqu'au refus de pénétration de la pointe (Fig. 9).

III.1.3 Sondage pressiométrique et valeur du tassement

Les courbes pressiométriques sont présentées en figures 11, 12 et 13. L'exploitation de courbes montre que la pression limite (Pl) varie de 1,9 à 13 MPa pour une moyenne de 7,45 MPa. Les valeurs correspondantes de module pressiométrique (E) oscillent entre 8,5 et 156,2 bars pour une moyenne de 82,36 MPa. Le rapport pressiométrique E/ Pl varie de 6,7 à 22,2. Les valeurs de tassement réel varient de 15,93 à 54 cm pour une valeur moyenne de 34,96 cm.

III.2 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES SOLS DE FONDATION

Les paramètres géotechniques étudiés sont le poids volumique des grains solides, la densité apparente, la granularité et les limites d'Atterberg.

III.2.1 Poids volumique des grains solides

Les valeurs de poids volumique des grains solides des argiles développées sur gneiss migmatique à biotite et amphibolite varient entre 2,68 et 2,70 gf/cm³, pour une valeur moyenne de 2,69 gf/cm³.

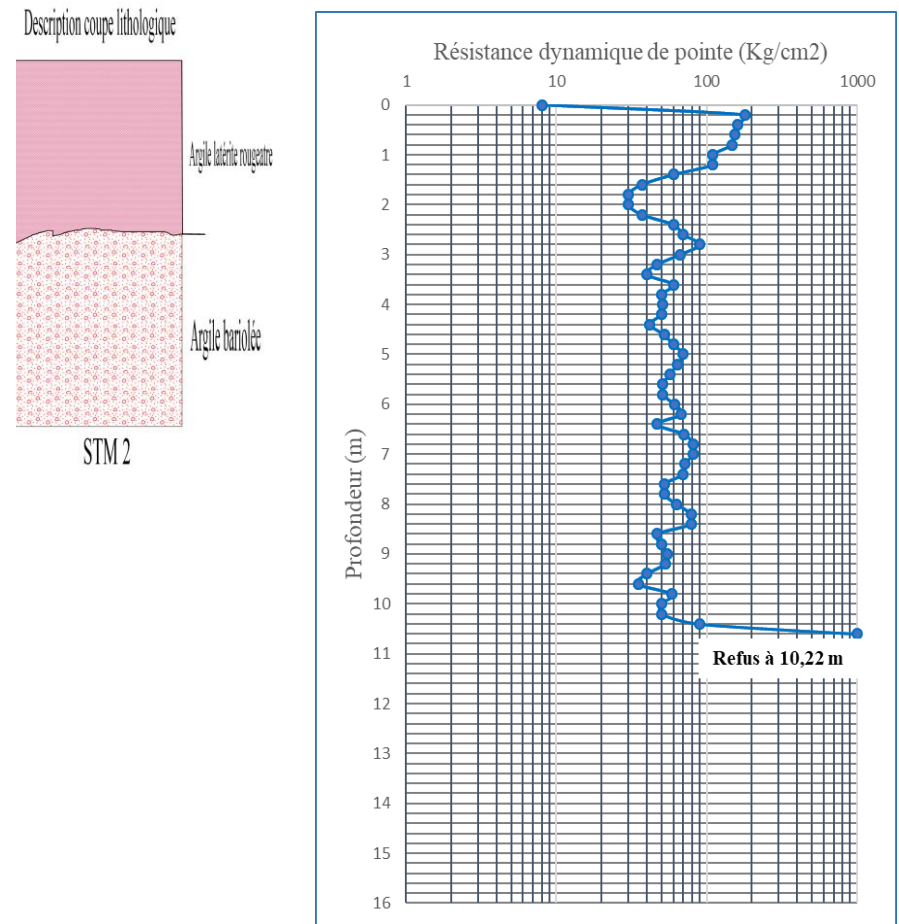
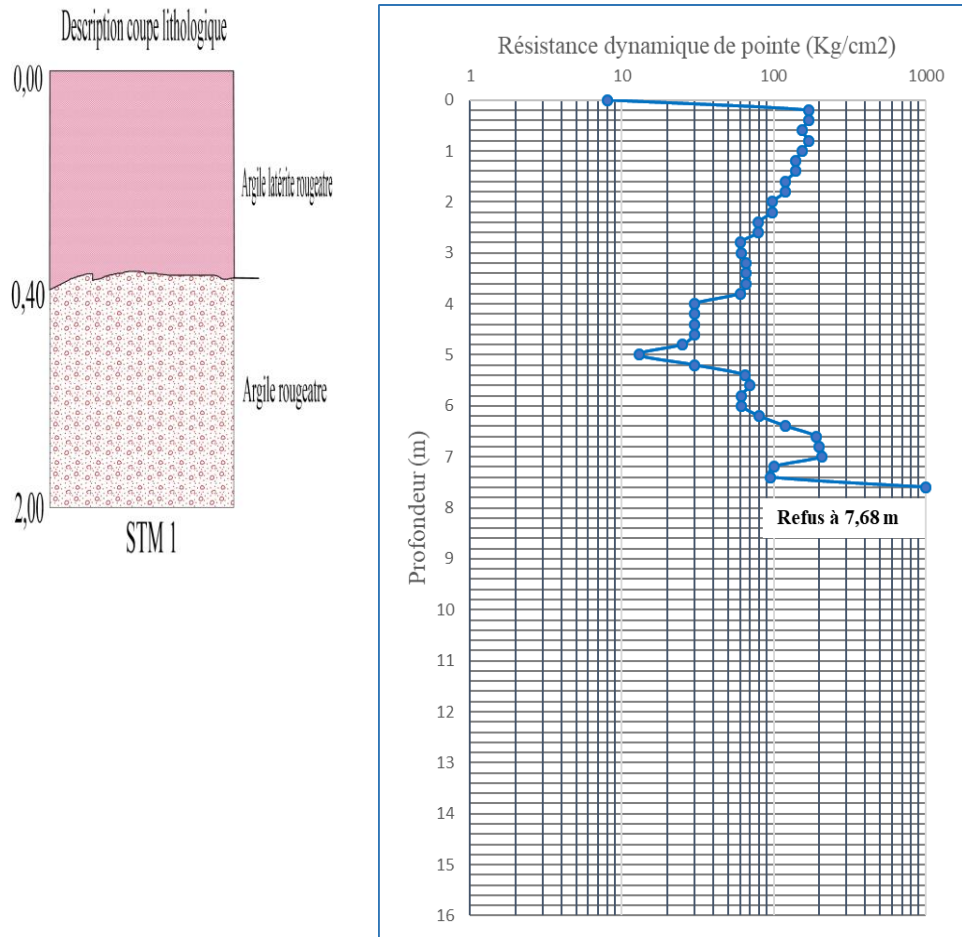


Figure 9. Coupes lithologiques des sondages Pénétrométriques du SPDL4 et 6 couplés à la coupe lithologique du STM

Tableau 2. Résultat de sondage pressiométrique

Sondage	Profondeur (m)	E (MPa)	Pl (MPa)	Em/pl	Qad réel (MPa)	Tassement (cm)	observations
SP 1	0 - 5,00	38,10 – 62,30	1,9 – 3,7	10,8 – 21,4	1,0	54	Normalement et sur consolidé
SP 2	0 – 6,00	8,50 – 27,3	6- 12,7	16 -24,5	1,37	32	surconsolidé
SP 3	0 – 9,00	24 – 156,2	2,3 - 10	10,43 – 16,7	0,98	15,93	Normalement et surconsolidé
Matériaux	Argiles rougeâtres						

E : module pressiométrique ; *Pl* : pression limite ; *Qad* : contrainte admissible

COUPE LITHOLOGIQUE

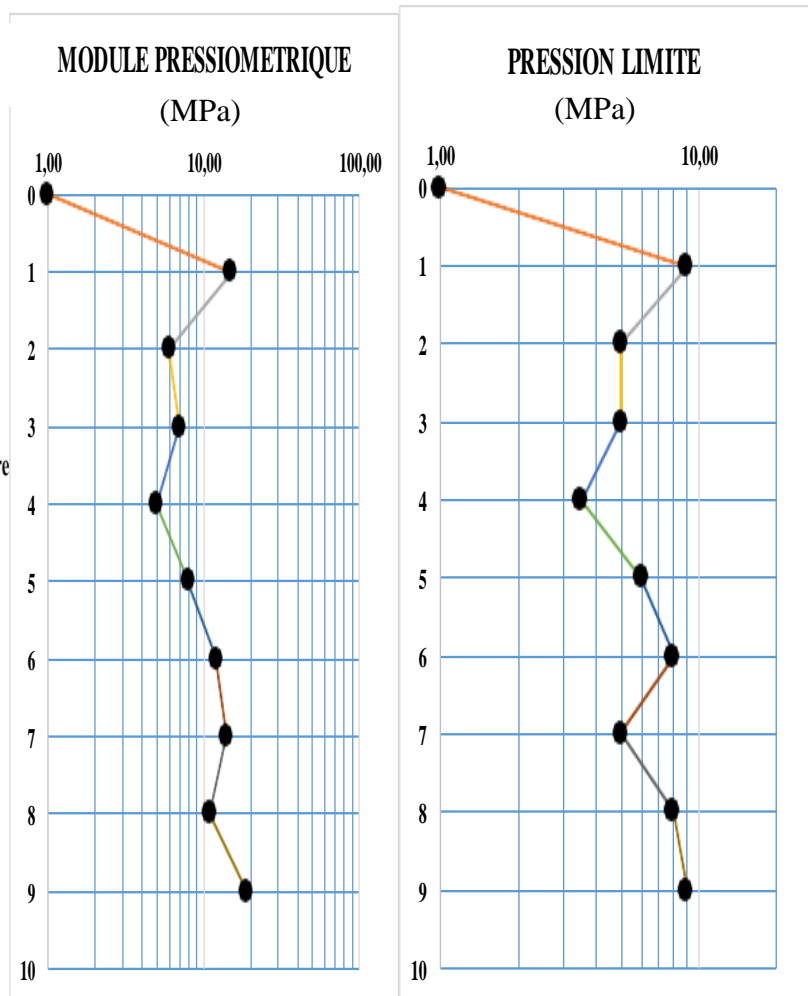
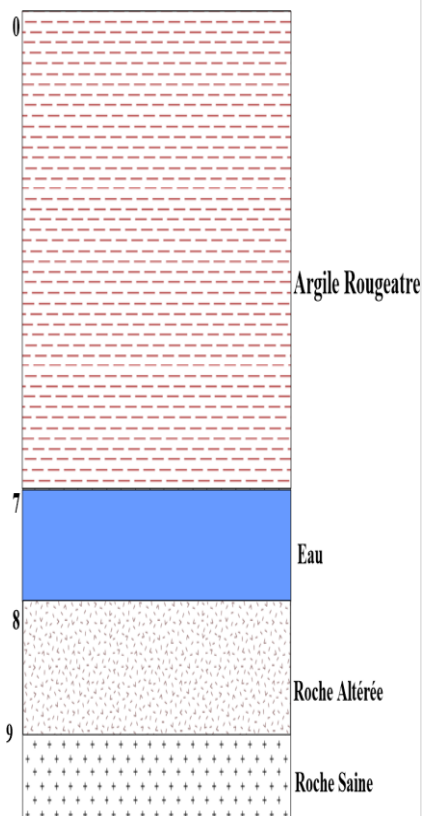
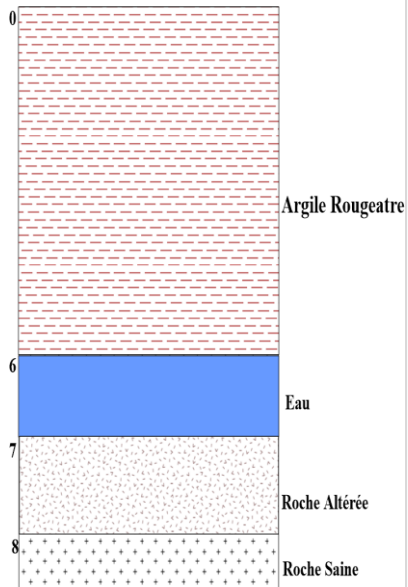
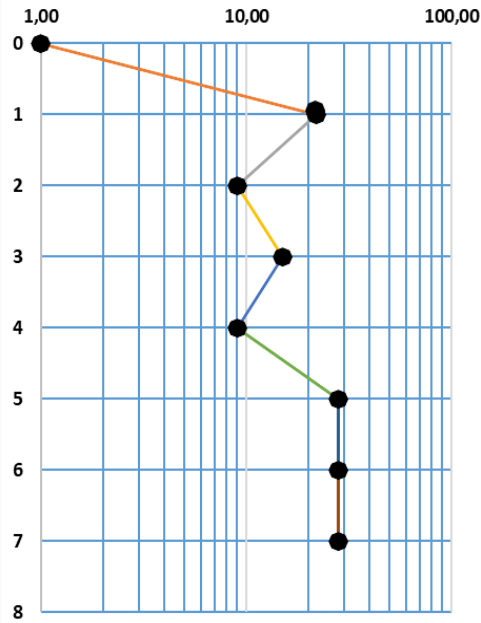


Figure 10. Profil pressiométrique SP1

COUPE LITHOLOGIQUE



MODULE PRESSIOMETRIQUE (MPa)



PRESSION LIMITE (MPa)

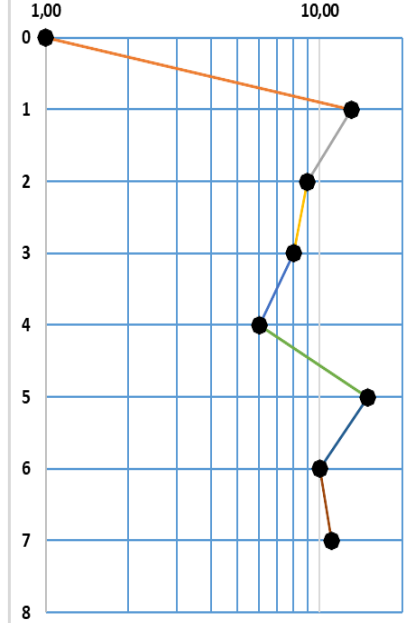
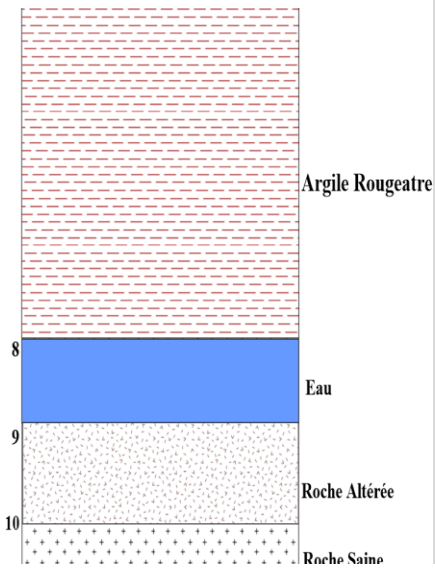
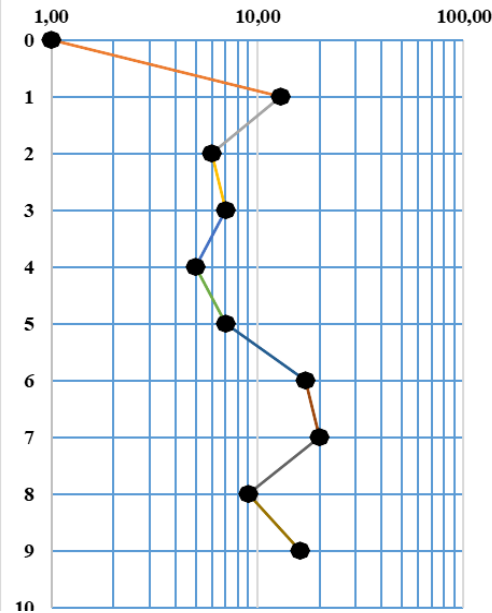


Figure 11 Profil pressiométrique SP2

COUPE LITHO LOGIQUE



MODULE PRESSIOMETRIQUE (MPa)



PRESSION LIMITE (MPa)

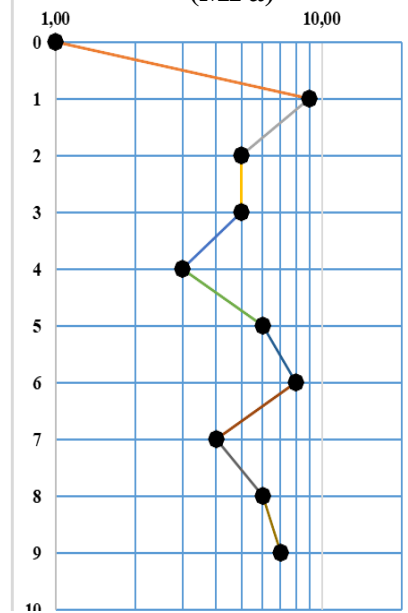


Figure 12. Profil pressiométrique SP3

III.2.2 Densité apparente

Les valeurs de densité apparente des matériaux argiles de la zone d'étude varient de 1,73 à 1,95 pour une moyenne de 1,84.

III.2.3 Granularité

Les courbes granulométriques des argiles développées sur gneiss migmatique à biotite et amphibolite de la zone d'étude sont représentées. L'exploitation de ces courbes montre que les matériaux étudiés sont constitués de forte teneur en argile (40,8 - 66 %) ; Les teneurs en limons sont moyennement faibles (1,7 – 19,2 %). Ces argiles se composent donc de 80 à 100 % de squelette, 80,8 à 100 % de mortier et 75 à 88 % de particules fines, soit 81,5 % de fines en moyenne.

III.2.4 Teneur en eau naturelle

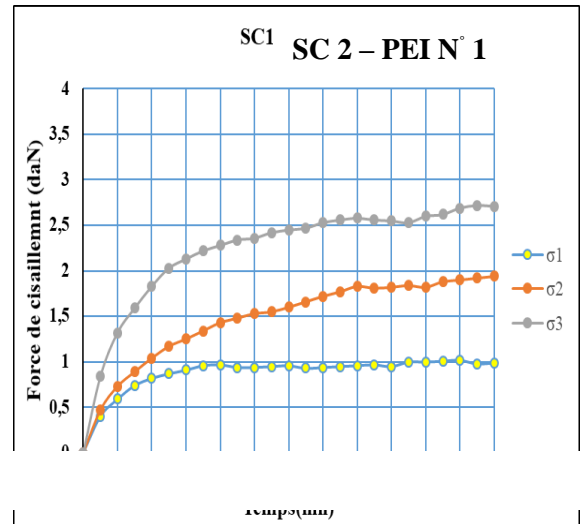
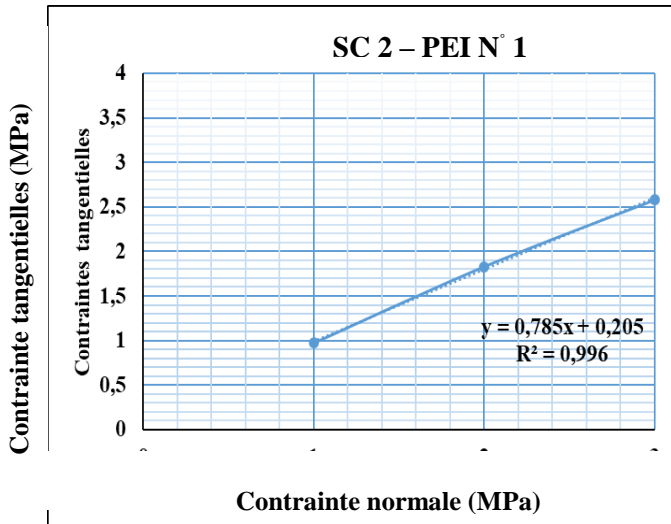
Les valeurs de teneurs en eau naturelle pour Les argiles sur gneiss migmatique à biotite et amphibolite varient entre 18,0 et 31,0 %. Ces valeurs dépendent des conditions hydro climatiques du milieu de prélèvement. Le degré de saturation (Sr) présente des valeurs oscillantes entre 75 et 88 % pour une moyenne de 81,5.

Tableau 3. Données récapitulatives des paramètres géotechniques

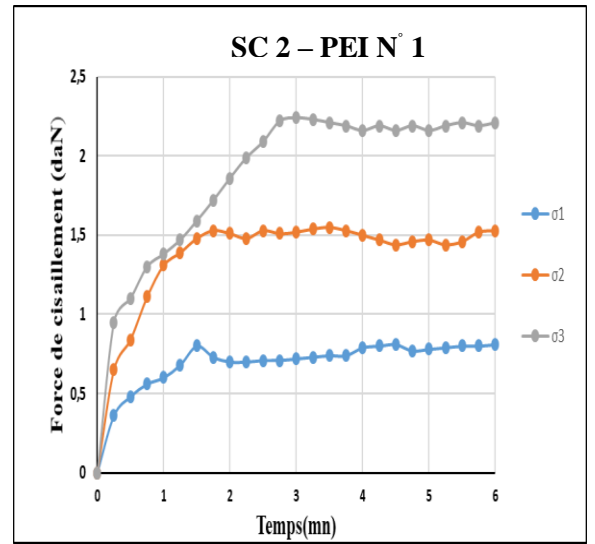
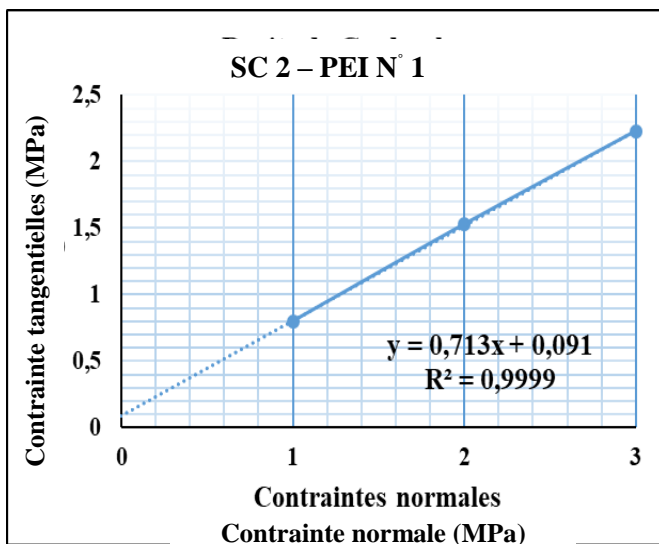
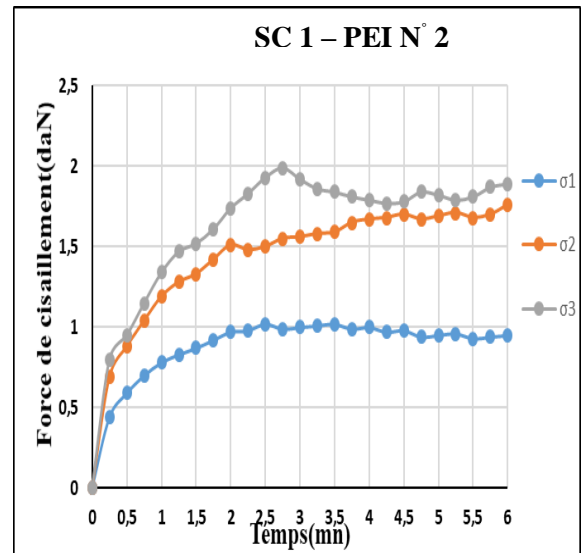
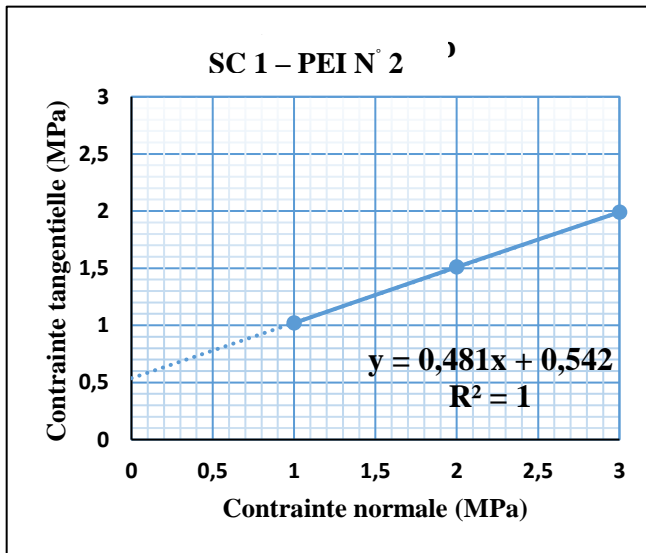
Noms des échantillons	e	Wnat (%)		Sr (%)	γ_s (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	da
SC1-PEI N°1	0,94	31		88	26,8	18,1	1,81
SC1-PEI N°2	0,6	18		79	26,5	19,5	1,95
SC2-PEI N°1	0,76	26		92	27	19,3	1,93
SC2-PEI N°2	0,88	26		80	26,8	18	1,8
SC3-PEI N°1	0,97	27		75	26,9	17,3	1,73

Tableau 4. Récapitulatif des résultats des essais géotechnique

Taille des particules



Limites d'Atterberg



CONCLUSION

Les sols de la zone de Yaoundé sont constitués d'argiles latéritiques (81,5 % fines). Ces argiles proviennent de l'altération du substratum sur lequel se développent les sols ferrallitiques présents dans la zone d'étude mais aussi des sols hydromorphes. Les sols de fondation étudiés ont des valeurs contraintes admissibles de 0,4 et 16,7 bars et une portance RQD comprises entre 7 et 300 bars. Ces sols présentent des valeurs de pression limites Pl comprises entre 1,9 et 13 bars avec un module pressiométrique (E) variant entre 8,5 et 156,2 MPa. La valeur moyenne de poids volumique des grains solides est de $2,67 \text{ g/cm}^3$. Les teneurs en fines sont comprises entre 50 et 88 %. Ces matériaux présentent une valeur moyenne d'indice de plasticité de 42,5 %, ces matériaux appartiennent aux classes A-7-6(20) ; A-7-5(20) et A-6-11(11). Les matériaux de la zone d'étude présentent des valeurs de cohésion comprises entre 0,91 et 68,7 KPa, des valeurs d'angle de frottement interne de 19° et 38° . Les valeurs œdométriques telles que le module œdométrique compris entre 51,92 et 96,71 bars, la valeur moyenne de l'indice de compression est de 0,203. Ces matériaux présentent une valeur moyenne du degré de compressibilité de 0,1056. Les limites de liquidité oscillent entre 62 et 72% tandis que celles de l'indice de plasticité sont supérieures à 20. Les valeurs de PDL s'étalent entre $0,4 < Q_d < 16,7 \text{ MPa}$ et $7 < RQ_d < 300 \text{ kg/cm}^2$. Ces matériaux investigués sont de classes A-7-6(20) ; A-7-5(20), A-7-6(20) ; A-7-5(20) et A-6-11(11). Les valeurs de la résistance au cisaillement présentent des valeurs variantes entre $19 < \Phi < 38^\circ$ et $0,91 < C_u < 68,7 \text{ Kpa}$ en laboratoire. Les données ainsi recueillies lors de l'étude servent à prédire les comportements du matériau rocheux. Les présents résultats sont interprétés et discutés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV. INTERPRETATION ET ESSAI DE DISCUSSION

INTRODUCTION

Le présent chapitre donne une interprétation significative aux résultats obtenus des travaux effectués sur le terrain et en laboratoire afin d'évaluer le comportement des sols de la zone d'étude pour leur implication dans les travaux de fondation afin de préconiser les solutions de fondations.

IV.1 COMPORTEMENT DES SOLS DE FONDATION DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1.1 Paramètres de portance

Les valeurs de résistance dynamique de pointe RQD des matériaux sont indicatrice de leurs performances en termes de portance. Les sols présentent de faibles portances si leur $-\infty < RQD < 12$ bars et d'excellentes performances ou portances lorsque $12 < RQD < +\infty$ (Pallier, 2007). Les valeurs de RQD des matériaux étudiés (7-300 bars) sont entre $-\infty < RQD < 12$ bars et $12 \text{ bars} < RQD < +\infty$. Les valeurs de RQD obtenues indiquent que le sol de fondation étudié, fait ressortir les horizons de portances différentes qui varient avec la profondeur. L'eau a été rencontrée à différentes profondeurs sur certains sondages (Annexe tab .2), on individualise les endroits à faible portance en argiles raides (7 et 12 Kg/cm² correspondant à 6,86 et 11,61 bars) et celle portance moyenne à forte caractérisant la présence du massif rocheux (12 et 300 Kg/cm² correspondant à 11,61 et 294,20 bars). Ces valeurs de portance du sol sont comparables à celles obtenues sur les argiles des formations d'El-kseur (12-36 bars) (Sadaoui, 2008) ; sur les formations de l'Est-Cameroun (Bertoua), avec des valeurs comprises entre (8-146 bars) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et le CCTP, avec la valeur atteignant 12 bars pour les zones de faible portance. Toutes fois ce résultat contraste de celui obtenu sur les argiles issues des roches plutoniques (1-18,5 bars) (Manou, 2018 ; Manfo, 2020). Ces sols de la zone d'étude présentent un comportement hétérogène en termes de Rp pour leurs implications en travaux de fondation ce qui permet de prédire qu'un traitement est nécessaire tel que la purge.

IV.1.2 Pressiomètre de Ménard

Les valeurs des caractéristiques pressiométriques Em et Pl sont très différentes. Cela implique que les essais sont dans deux couches de sol. Le rapport Em/Pl donne la classification du sol (philipponnat, 2002). Les valeurs du rapport Em/Pl des matériaux étudiés (10,8 – 24,5) sont toutes comprises entre 8 et 30. Ce sont des argiles normalement consolidées et surconsolidées (philipponnat, 2002 ; Fathallah *et al.*, 2016).

Les argiles de la zone d'étude, ont un module pressiométrique variant de 0,85 à 15,62 Mpa soit 8,5 à 156,2 bars et une pression limite allant de 0,19 à 1,27 Mpa soit 1,9 à 12,7 bars. Les résultats dans ces argiles corroborent avec ceux trouvés sur les argiles en Algérie ($0,2 < E_m < 31,7$ Mpa et $0,1 < P_l < 3,32$ Mpa) (Sadaoui, 2008). Toutefois, ce résultat se rapproche de celui

obtenues sur une argile normalement consolidée dans la zone de Tébessa en Algérie, avec des valeurs de ($7,82 < E_m < 13,30$ Mpa et $1,09 < P_l < 1,9$ Mpa) (Fethallah *et al.*, 2016). Toutefois, ces résultats de rapport pressiométrique contrastent de celles obtenues sur argiles développées sur roche plutoniques, avec des valeurs de ($0,43 < E_m < 4,34$ Mpa et $0,18 < P_l < 0,98$ Mpa comprises entre 2,41 et 4,42 Mpa) (Manou, 2018) ; sur argiles développées sur gneiss et chloritoschistes avec des valeurs de ($0,073 < E_m < 9,67$ Mpa et $0,0025 < P_l < 0,301$ Mpa) (Fankem, 2021).

Les valeurs de référence du tassement normale sans dégâts sont égales à 7 cm et celles supérieures à 7 cm sont des tassements excessifs provoquant les déformations du sol (Lerau, 2006). Les sols investigués présentent tous de valeurs de tassement (15,93 – 54 cm) sont toutes supérieur à 7 cm. Cette valeur indique que le sol en place est lâche et facile à se rompre sous charge très élevée.

Cette variation d'argiles normalement consolidées à surconsolidées est due au faite que la topographie du sol investigué à impacté le sol dans le passé en le soumettant une pression plus grande que celle du poids des couches supérieurs (BIGRAFT, 2021). Ce résultat traduit la faible performance de ce sol sous l'effet de la charge.

IV.1.3 Poids volumiques des grains solides

Les argiles latéritiques ont de faibles performances si leur masse volumique des grains solides est inférieure à $2,75 \text{ g/cm}^3$ et, d'excellentes performances, si la valeur de ce paramètre est supérieure ou égale à $2,85 \text{ g/cm}^3$ (De Graft Johnson *et al.*, 1972 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Paige-Green *et al.*, 2015). La valeur moyenne du poids volumique des grains solides des argiles développées sur gneiss migmatitique à biotite et amphibole donne en moyenne de $2,69 \text{ gf/cm}^3$ donc inférieure à $2,75 \text{ gf/cm}^3$. Ces sols (argiles) ont de faibles performances pour servir de sol d'assise des ouvrages.

La valeur moyenne obtenue ($2,69 \text{ gf/cm}^3$) est supérieure à celles obtenues dans les matériaux de la zone de Ntui ($2,65 \text{ g/cm}^3$) (Ekodeck, 1984), sur les schistes Ayos au Centre ($2,64 \text{ g/cm}^3$) (Onana, 2002). Cette valeur est également supérieure à celles obtenue sur les argiles sur micaschiste à Mfou au Centre ($2,62 \text{ g/cm}^3$) (Tchakam, 2011), sur les argiles sur roches plutoniques au Sud Cameroun ($2,48 \text{ gf/cm}^3$) (Wongolo, 2011 ; Manou, 2018). La valeur obtenue est comparable à celle obtenue sur les argiles développées sur roche métamorphique au Centre Cameroun ($2,44\text{-}2,78 \text{ gf/cm}^3$) (Bekon, 2011 ; Bella, 2011). Toutefois cette valeur moyenne ($2,69 \text{ gf/cm}^3$) est inférieure à celles obtenue sur les matériaux de l'Ouest Cameroun qui ont un poids volumique des grains solides qui montre l'évolution de la performance de ces matériaux comme support des ouvrages ($2,70\text{-}2,84 \text{ gf/cm}^3$) (Ngami, 2012).

IV.1.4 Granularité

Les matériaux étudiés montrent des pourcentages de fines supérieur à 35%, et de squelette compris entre 80 et 100%. La courbe granulométrique des argiles de la zone d'étude ne s'insère pas dans le fuseau de spécification pour couche de fondation.

Les proportions élevées en fines 81,5 % s'explique par une altération très poussée du sol support, il s'agit d'une argile latéritique (Mukenga, 2013). La valeur moyenne (81,5 %) obtenue contraste à celle obtenue dans les matériaux développés sur granite de Menve'ele au Sud (88 %) (Manou, 2018). Cette valeur moyenne (81,5 %) est supérieure à celles obtenues sur micaschiste grénatifère de Mfou au Centre (68,4 %) (Tchakam, 2011), sur les argiles développées sur gneiss d'Okola-Yaoundé (39,4 %) (Bekon, 2011). Cette valeur est également supérieure à celles obtenues sur les argiles développées sur gabbro-doérite d'Evelessi à Sangmelima Sud-Cameroun (65,5 %) (Wongolo, 2012), sur les argiles développées sur basalte et gneiss migmatitique dans les hauts plateaux de l'ouest Cameroun (61,5 % et 40,1 %) (Ngami, 2012), sur sol non saturé à Ottawa au Nigéria (78 %) (Goh *et al.*, 2015), sur sol argileux de Malbase (34%) (Vidyarthi *et al.*, 2018). Les sols de fondation étudiés sont très élevés en fraction fine pour une utilisation comme support d'assise. Ce qui permet de préconiser un traitement physique notamment une correction granulaire est nécessaire.

Les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c n'ont pas pu être calculés à cause de l'absence des paramètres pour les matériaux devant servir d'assise du bâtiment. L'allure continue des courbes permet de prévoir que le sol possède une stabilité interne Kenny et Lau, 1985 in Patrick (2001).

La valeur de LL obtenue, est cependant inférieur à celle obtenue les matériaux développés sur gneiss à Okola au Centre (70 %) (Bekon, 2011), et sur migmatites d'Eseka (63 %) (Bikond, 2011).

La valeur moyenne d'indice de plasticité (IP) des matériaux argileux développés sur migmatitique à biotite et amphibole de la zone d'étude (42,5%) est comparable à celles obtenues sur granites de Ngaoundéré (18, 5 %) (Abdoul, 2001), sur les migmatites d'Eséka (29 %) (Bikond, 2004), sur schistes d'Ayos au Centre (26%) (Ntouala ,2009), sur gabbros d'Evelessi au Sud Cameroun (22%) (Wongolo, 2011). Cette valeur de IP est également comparable à celles obtenues des argiles sur les micaschistes de Mfou au Centre (29,3 %) (Tchakam, 2011), sur gneiss d'Okola-Yaoundé (27,7 % à 34,7 %) (Bekond, 2011), sur granites d'Ebolowa au sud

IV.1.5 Indice de consistance

Les valeurs de l'indice de consistance révèlent des matériaux à l'état solide ($I_c > 1$) (Soukatchoff, 2011) et de matériau mous ($I_c < 1$). Cette variation de consistance dépendrait de

la teneur en eau naturelle des matériaux étudiés ou de leurs capacités de sensibilité à l'eau (Soukatchoff, 2011). Et le potentiel de gonflement, qualifie ces matériaux de sol peu gonflants ($\epsilon_s < 1,5$) (Millogo, 2008).

IV.1.6 Teneur en eau

Les valeurs de la teneur en eau naturelle des matériaux de la zone d'étude varient de 18,00 à 31,00% pour une moyenne de 24,5 %. La valeur moyenne obtenue (24,5 %) est inférieure avec les résultats obtenus sur granite de Menve'ele Sud Cameroun (26,5 %) (Manou, 2018), sur gabbro d'Evelessi à Sangmelima Sud-Cameroun (36 %) (Wongolo, 2012). Cette valeur de teneur en eau est cependant supérieure à celle des argiles développées sur basalte et gneiss migmatitique dans les hauts plateaux de l'ouest Cameroun (15,91 % et 21,93 %) (Ngami, 2012), sur des matériaux de même nature développées sur gneiss d'Okola-Yaoundé (20,8 %) (Benkon, 2011). Cette valeur moyenne (24,5 %) s'étale sur les argiles insaturés Nigéria (18 et 39%) (Nwankwoala, *et al.*, 2014). La faible valeur de teneur en eau naturelle et la forte valeur du degré de saturation caractérisent une porosité argileuse (Soukatchoff, 2007).

Les sols (argiles latéritiques) de la zone d'étude doivent être améliorés ou substitué pour une implication en travaux de fondation.

Ces sols possèdent des valeurs de masse volumiques des grains solides inférieur à 2,75 g/cm³ ; ce qui prédit également des performances faibles en travaux de fondations (De Graft-Johnson *et al.*, 1972 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Paige-Green *et al.*, 2015).

IV.1.7 Classification

Les matériaux étudiés sont des argiles plastiques d'après la classification de Casagrande. Ceux-ci d'après la classification HRB de classes A-7-5 (20) ; A-7-6 (20) et A-7-6 (11). Ces matériaux ont un comportement médiocre à mauvais pour une utilisation en travaux de fondation. Ces matériaux ne sont pas convenables et nécessite une amélioration.

Granites de Ngaoundéré (49,5 Kpa) (Abdoul, 2001), sur les micaschistes de Mfou (6,20 Kpa) (Tchakam, 2011).

IV.2 Techniques d'amélioration des sols ou solution de fondation

Au regard des résultats obtenus, le sol d'assise du site de construction de l'ouvrage présente un caracypère hétérogène, de comportement médiocre et nécessite d'être traité ou améliorer avant utilisation. Cependant, les techniques d'amélioration de sols d'assise des ouvrages sont entre autres : la correction granulaire ajouts des stabilisants, purges, substitution. Comme solution de fondation afin de minimiser les dégâts tels que : tassement, glissement de terrain sur des sols hétérogènes il est souhaitable d'adopter des fondations superficielles (radier général) ou encore des fondations profondes (pieux entrants) (Eurocode 7, Fascicule 62).

CONCLUSION

Les sols rencontrés dans la zone d'étude, sont issus des processus d'altération du substratum en présence (Gneiss), d'épaisseur et de couleurs variables. Ces sols sont constitués uniquement des argiles gisant sur roche mère.

Sur le plan de reconnaissance, les sols (argiles) de la zone d'étude sont des argiles normalement consolidées et sur consolidées Em/Pl (8 – 20) et, de portance variable RQD (7 – 300 bars) et présente un comportement hétérogène, avec des tassements excessifs supérieurs à 7 cm.

Sur le plan géotechnique, ce sont des sols de classe A-7-5 (20) ; A-7-6 (20) et A-7-6 (11) et ont un comportement médiocre à mauvais en construction de cet ouvrage. Les valeurs du poids volumique de grains solides inférieurs à 2,75 gf/ cm³ indiquent que ces sols ont de faibles performances pour servir de support d'assise de fondation. Les valeurs de cohésion C_u (0,91 – 68,7 Kpa) et d'angle de frottement (19 et 38°) confère un caractère frottement et cohésif à ces argiles. Les paramètres de déformabilité des matériaux montrent que les sols de fondation de la zone d'étude sont des argiles raides moyennement déformable ($C_c = 0,203$; $E_{oed} = 51,92 - 96,71$ bars ; $R = 0,1056$). Les sols de la zone d'étude nécessitent un traitement particulier tel que l'ajout des stabilisants ou encore un radier général.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La zone d'étude est située dans le Département du Mfoundi, Région du Centre et arrondissement de Yaoundé au Cameroun. Elle s'étend entre 03°52'48'' et 03°51'36'' de latitude Nord, et entre 11°30'00'' et 11°31'12'' de longitude Est, et appartient à l'unité géomorphologique d'altitude comprise entre 660 et 1060 m. Elle est soumise à un climat subéquatorial Yaoundéen à quatre (04) saisons inégalement réparties dans l'année. Le réseau hydrographique est dendritique avec pour principal cours d'eau le Mfoundi. Le relief de la zone d'étude est caractérisé par Le modelé présentant trois grandes unités géomorphologiques. À l'origine d'une végétation qualifiée de forêt humide toujours verte, influencée par les activités anthropiques et l'accroissement de l'urbanisation. Le substratum est d'âge archéen est constitué de roches métamorphiques, où se développent les sols ferralitiques et hydromorphes. La méthodologie adoptée a consisté en la réalisation des travaux de terrain et en laboratoire. Les méthodes de terrain ont consisté en la description et à la reconnaissance des sols en place. Les essais de laboratoires ont porté en la détermination des propriétés géotechniques.

Sur le plan de reconnaissance, les sols du site de construction de l'ouvrage sont des argiles normalement consolidées et surconsolidées Em/Pl (8 – 20) et, de portance variable RQD (7 – 300 Kg/cm²) et présente un comportement hétérogène, avec des tassements excessifs supérieurs à 7 cm.

Sur le plan géotechnique, les sols de fondation de la zone d'étude sont argileux et plastique (% fines = 81,5 ; IP > 40 %), de classe A-7-5(20) ; A-7-6 (20) et A-7-6(11). Ils ont un comportement médiocre à mauvais en construction des ouvrages. Les valeurs de poids volumique de grains solide inférieurs à 2,75 gf/ cm³, indiquent qu'ils présentent de faibles performances pour servir de support d'assise de fondation. Les valeurs de cohésion Cu (0,91 – 68,7 Kpa) et d'angle de frottement (19 et 38°) confèrent un caractère frottement et cohésif à ces argiles. Les paramètres de déformabilité des sols montrent que les sols de fondation de la zone d'étude sont des argiles raides moyennement déformable (Cc = 0,203 ; Eoed = 51,92 – 96,71 bars ; R = 0,1056). Les sols de la zone d'étude nécessitent un traitement particulier tel que l'ajout des stabilisants ou encore un radier général.

En guise de perspective

- prévoir la stabilité du sol support des fondations de l'ouvrage par ajouts des stabilisants ;
- mettre un accent particulier sur la corrélation de la méthode géotechnique avec la méthode géophysique afin d'avoir des informations latérales et verticales de ces sols avant la mise en place de l'ouvrage ;
- étendre les études sur les propriétés génétiques du matériau.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdoul Kadiridewa, 2001. Etude géotechnique des produits d'altération sur granite de Ngaoundéré. DEA, Univ. Ydé I, 75p.
- Afana C, 2017. Etude du comportement d'un matériau pour couche de roulement d'une route en terre, Mém. Fac. Sci. Univ. Yaoundé 1 79p. Application au génie civil bâtiment et route). Thèse doctorat, université d'Ouagadougou. 144p.
- Amin BM, Benbelli B, Djerbov L, Petrisor AL, 2018. Use of GIS systems to analyse soil compressibility, Swelling and bearing capacity under superficial foundation in Algiers région, Algeria.
- Angue Abane M, 1982. Etude géologique des séquences et faciès d'altération des gneiss migmatitiques du Sud- Ouest de Yaoundé. Mém. maîtrise, Fac-Sci., Univ. Yaoundé, 60p.
- AVOR, 2010. Mécanique des sols/ essai oedométrique et classification.
- Bagarre E, 1990. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED.143p.
- Bagnouls F, Gaussen H, 1957. Les climats biologiques et leurs classifications. Ann. Géor. 18, N°335, Paris, 193-220p.
- Bella N, (2011). Caractérisation géophysique et géotechnique des formations superficielles de la sportive d'OLEMBE Yaoundé, Master université Yaoundé I, 112 pages.
- Bekon Ndong G, 2011.Etude géotechnique des produits d'altération et des granulats gneissiques du secteur d'Okola. Master. Géosc.Univ. de Yaoundé I, 61P.
- Bessoler O, Al Heib M, Masrouri F, Wojkowiak F, 2004.Recherche d'une corrélation entre les essais de pressiométriques et les essais de cisaillement de la boratoire application aux grès vosgiens.
- BIGRAFT, 2021. Rapport des essais de reconnaissance géotechnique *in situ* de l'ART.
- Bitom LD, 1982. Contribution à l'étude structurale et morphologique des séquences et faciès d'altération des gneiss migmatitiques de Yaoundé. Mém. maîtrise, Fac-Sci., Univ. Yaoundé, 71p.
- Bikond TN, 2004. Caractérisation et intérêts géotechniques des matériaux du secteur Eséka-Lolodorf : secteur Eséka - Manguènguès. Mém. DEA, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 78 p.
- Bouassida R, Bousseta R, 2007. Manuel de travaux pratiques de mécanique de sols. Centre de publication Universitaire, Tunis-Tunisie. 116p

- Brice, 2011. Contribution à l'étude géotechnique et minéralogique des produits d'altération de la région du Centre (Mfou) et valorisation ces matériaux dans le souci de leur éventuelle utilisation en construction routière. Mém. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 66 p
- Code Munsell, 1975. Munsell soil colors charts. Ed. 1975.
- Combarieu O, 1995. L'essai pressiométrique et la résistance au cisaillement des sols. Bulletin de LPC, vol. 229, pp 21-31.
- Costet J, Sanglerat G, 1981. Cours pratiques de mécanique de sols indice de plasticité et calcule des tassements. Dunod. Ed. Paris, 283p.
- Ekodeck GE, 1984. L'altération des roches métamorphique du sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Th. Doc. D'Etat ès Sci- Nat., IRGM, Univ. Scientif Et Médic., Grenoble I, France, 368p.
- Fascicule n°62 titre V 1993. Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil (équipement-logement) ministère de l'équipement et du logement, France.
- Fankem U, 2021. Etude de corrélation entre les résultats de l'essai au pénétromètre dynamique lourd et de l'essai pressiométrique (cas de l'autoroute Yaoundé-douala).
- Fathallah Y, Merzoufui A, 2016. Utilisation de l'essai pressiométrique pour le calcul des fondation superficielles 99p.
- <http://www.memoireonline.com/08/09/2521/Identification-geotechnique-de-materiau;>
- Philopponat G, Hubert B, 2008. Fondation et ouvrages en terre. Eyrolles, Paris, France. 548p.
- Isacc Olivier Hieng, 2003. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun, Edition Clé, Yaoundé Cameroun, 147p.
- Labogenie, 2018. Rapport des essais de reconnaissance géotechnique de l'ART.
- Lerau, 2006. Mécanique des sols. Cours théorique 3^{ème} année Ingénierie de la construction de INSA de Toulouse. 102p.
- Letouzey R, 1985. Carte phytogéographique du Cameroun au 1/50000 avec notice explicative, Institut de la carte internationale de la végétation, Fasc. 3-4, 63-142p.
- Manou OCP, 2018. Caractérisation géotechnique des sols de memve'ele (Ebolowa) en vue d'implantation des pylônes de haute tension PK30- PK60. Mém. Master. Géosc. Univ. de Yaoundé I, 62P.

- Millogo Y, 2008. Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières argileuses et latéritiques du Burkina Faso améliorée aux liants hydrauliques.
- Munsell soil color charts., (2000). Revised washable edition.
- Mvondo H, 2003. Analyse structurale et pétrogéochimique des roches de la région de Yaoundé Nord : arguments géotechniques de la chaîne panafricaine au Cameroun. Th. Doct. Fac. Sci- Univ. Yaoundé I, 180p.
- Narimene B, Asma N, 2017. Etude des paramètres influents sur la portance du sol saturé 23p.
- Ndam NJR, Braun JJ, Meybeck M, Bedimo BJP, 1998. Réactualisation des données hydroclimatiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud Cameroun). Géocam 2, Presses Universitaires, Yaoundé 51–64
- Ndjigu P-D, Badinane MFB, Nyeck B, Nandjip HPK, Bilon P, 2013. Minéralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the SW of Yaoundé, south Cameroun. J. Afri. Earth Sci, 79, 125-142
- Ngon Ngon GF, 2007. Etude morphologique, minéralogique, géochimique et cristallographique des argiles latéritique et hydromorphe de la région de Yaoundé en zone tropicale humide. Essai industriel et évaluation de leurs potentialités comme matériaux de construction. Th. Doc. Univ. Yaoundé I, département des sciences de la terre et de l'univers, 185 p.
- NF P 94-050. Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage. AFNOR, septembre 1995. 6 p.
- NF P 94-051. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle et la limite de plasticité au rouleau. AFNOR, mars 1993. 16 p.
- NF P 94-054. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des paramètres physiques du sol. Masse volumique des particules solides du sol. AFNOR, 1991.
- NF P 94-056. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage. AFNOR, mars 1996. 16 p.
- NF P 94-057. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par sédimentation. AFNOR, mai 2012.
- NF P 94-071. Sols : reconnaissance et essais. Essai de cisaillement alterné à la boîte de Casagrande réalisé dans les conditions consolidées drainées sur tous les sols fins. AFNOR, 1994.

- NF P 94-090. Sols : reconnaissance et essais. Essai œdométrique sur les matériaux fins quasi saturé avec chargement de paliers. AFNOR, décembre 1997.
- NF P 94-110. Sols : reconnaissance et essais. Essai préssiométrique Ménard. AFNOR, janvier 2000.
- NF P 94-115. Sols : reconnaissance et essais. Sondage au pénétromètre dynamique lourd de type B. AFNOR, décembre 1990.
- XP P 94-202. Sols : reconnaissance et essais. Prélèvement des échantillons des sols et roches
- Ngami PF, 2012. Caractérisation géotechnique des matériaux d'altération sur gneiss migmatitiques et sur basaltes de la région de Tonga-Bangangté (Ouest-Cameroun). Mém. Master. Fac Sci. Univ. Yaoundé I, 123 p.
- Ntouala RF, 2009. Les schistes d'Akok Maka (Est Cameroun) et leurs produits d'altération : Géologie et intérêt géotechnique. Mém. Mast. Fac.Sci. Univ. Yaoundé I. 94p.
- Nwankwoala HO, Amadi AN, Ushie FA, Warmate T, Eze CJ, 2014. Détermination of subsurface geotechnical properties for foundation design and construction in AKENFA community Bayelsa state, Nigéria.
- Magnan JP, Pilot G. Amélioration des sols
- Massamba N, 2013. Contribution à l'étude des sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse. Fac. Sci. Univ. Paris-Est. Cheik Anta Diop. Dakar. 20 p.
- Mukenga W, 2013. Evaluation de la stabilité d'une zone à risque colonisée par un habitat spontané: cas d'Eloundem(département du Mfoundi). Mém. master. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 96 p.
- Nzabakurikiza A, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzié Mvindi AT, Ekodeck GE (2017). Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from eastern Cameroon for road construction purposes. Bull Eng Geol Environ 76: 1549-1562.
- Nzenti JP, 1987. Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine Nord Equatoriale. Th. Doct. 3ème cycle, Univ. Nancy I -France, 147P.
- Olinga JB, 2003. Cadre géodynamique et évolution tectonométamorphique des ensembles cristallophylliens d'Awae et Ayos (Sud Cameroun). PhD thesis. Université de Yaoundé I, Yaoundé, p 159
- Olivry JC, 1986. Fleuves et rivières du Cameroun, MESRES-ORSTOM éd., N°9, Paris 173p.

- Onana VL, 2001. Caractérisation et intérêts géotechniques des produits d'altération des roches métamorphiques du secteur Mengang-Mfoumasi (région de Yaoundé-Cameroun).Mém. Maît. Fac.Sci. Uni. Yaoundé I. 81p.
- Onana VL, 2002. Les roches de la série d'Ayos et leurs produits dérivés : Altérologie – géotechnique – intérêts. Mém. D.E.A. Fac.Sci. Uni. Yaoundé I. 57p.
- Onguene M, 1993. Différenciation pédologiques dans la région de Yaoundé Transformation d'un sol rouge ferrallitique, en sol à horizon jaune et relation avec l'évolution du modelé, Thèse Univ. Paris V, 254p.
- Orane S, 2016. Guide terre vivante de l'autonomie au jardin : fondation sur sol argileux, terrain sensible. [http://www. M-habitat.fr](http://www.M-habitat.fr)
- Paillier C, 2007. Essai pénétrométrique. IUT St Pierre- Département Génie civil.
- Robitaille V, Tremblay D, 1997. Mécanique des sols. Théorie et pratique. Tome 1.biblio.nat.Canada. 652 p.
- Sadoui O, 2008. Analyse critique des resultats des essais in situ et calcul de capacité portante des fondations en utilisant le penetrometre statique et le pressiometre.
- Santoir C, Villiers JF, 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Végétation, ORSTOM éd
- Segalen P, 1967. Les sols et la géomorphologie du Cameroun. Cah. ORSTORM. Sée. Pedol. Vol. V, N°2, PP. 137-187.
- Souaibou, 2008. Caractérisation géotechnique des argiles alluvionnaires de la vallée du Nyong à Akonolinga(province du centre). Mém. Mait. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 57 p.
- Suchel P, 1987. Les climats du Cameroun, thèse de doctorat. Etat, Université de Bordeaux France, tome II, pp.797-1097.
- Tchakam Kamtchueng B, 2011. Etude géotechnique et minéralogique des produits d'altération issus des micaschistes de la localité de Mfou en vue de leur utilisation en construction routière. Master. Univ. Ydé I, 130p
- Vallerie M, 1995. Contribution à l'étude des sols du Centre Sud Cameroun : type de différenciation morphologique et pédogénétique sous climat équatorial, ORSTORM.
- Wongolo DMH, 2012. Etude des propriétés physico-mécaniques des produits d'altération des gabbros-dolérites d'Elvessi (Sud-Cameroun) pour leur valorisation en construction routière. Mém. DEA, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 64 p.

Yongue Fouateu R, 1986. Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse de Doctorat. 3ème cycle, Univ. Yaoundé I, 214 p.

Younoussa Millogo, (2008). Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route). Th. Univ. d'Ouagadougou, 157 p.

ANNEXES

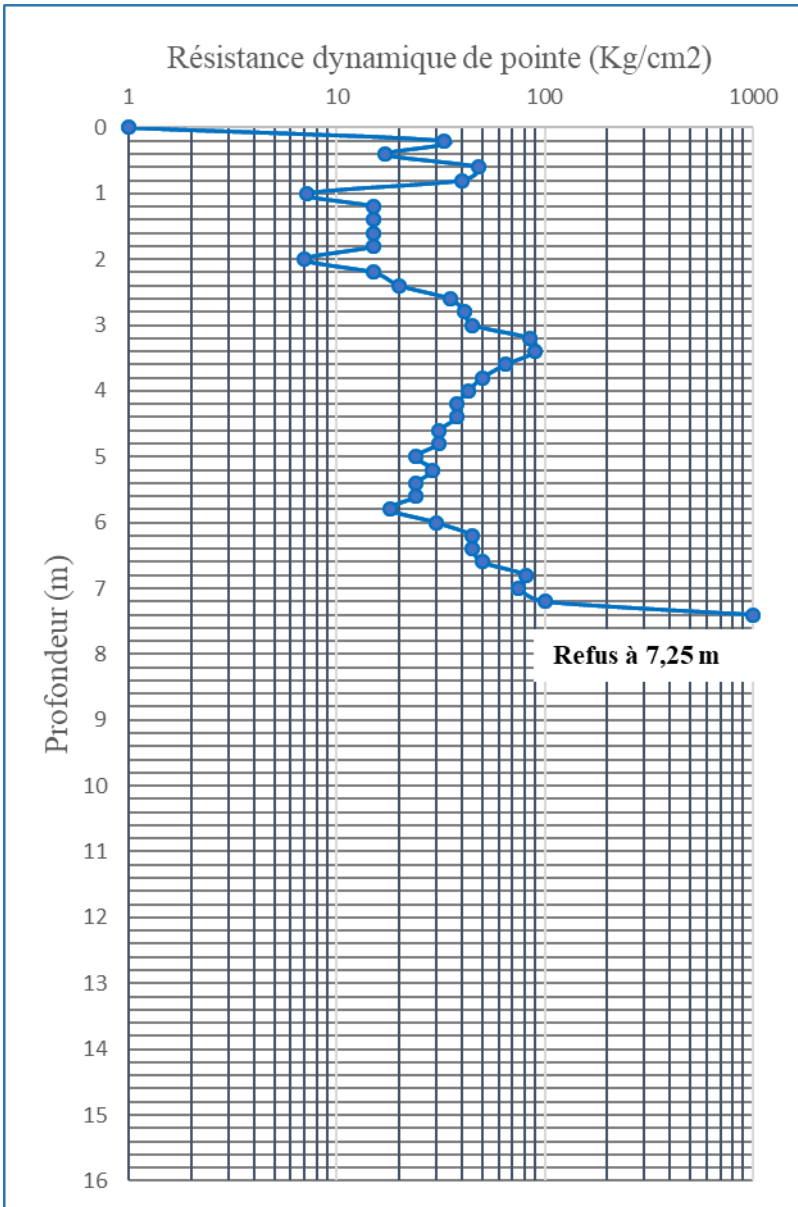
ANNEXE 1. TABLEAUX

Tableau I. Résultats de l'analyse granulométrique et sédimentométrique

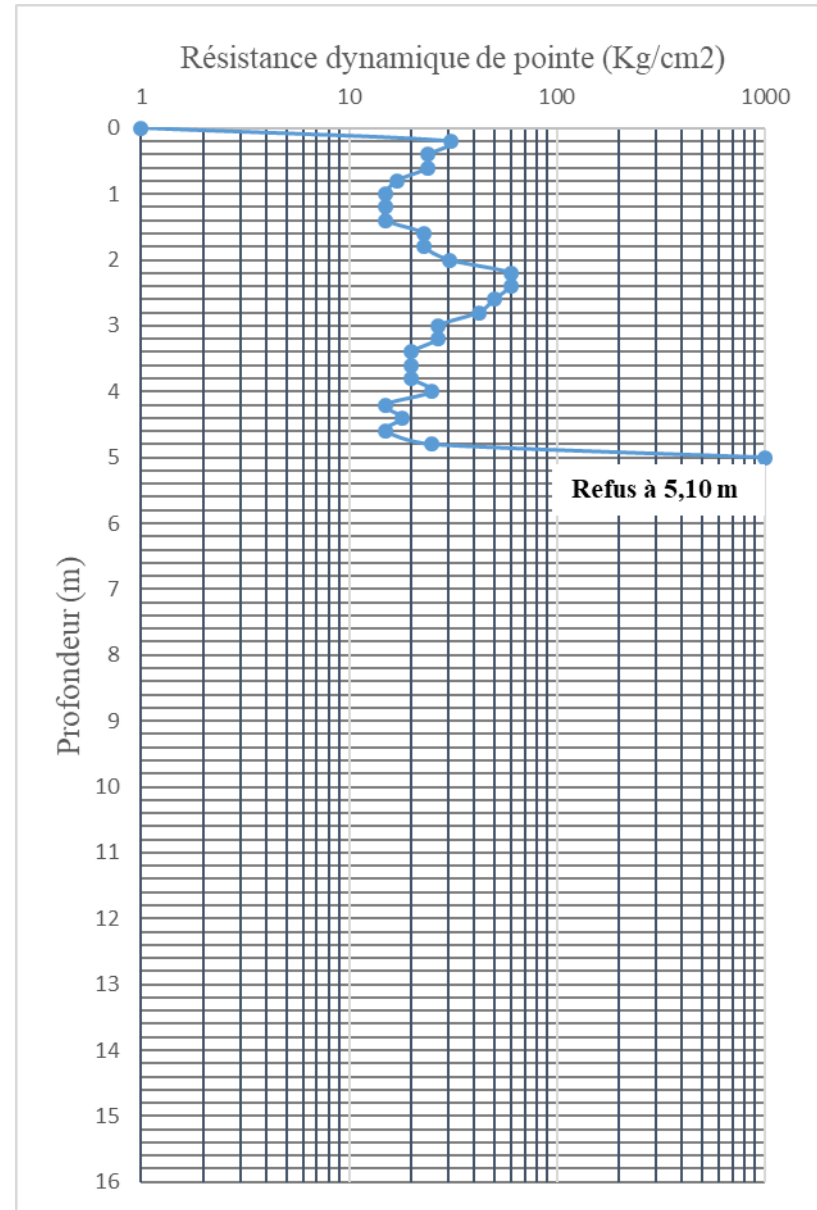
	SC1-PEI N°1	SC1-PEI N°2	SC2-PEI N°1	SC2-PEI N°2	SC3-PEI N°1
Tamis	Tamisats(%)	Tamisats(%)	Tamisats(%)	Tamisats(%)	Tamisats(%)
20	100	100	100	100	100
16	100	100	100	10	100
12,5	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100
10,75	100	100	100	100	98,8
10,25	100	100	100	100	96,8
10	100	100	100	100	92,8
8	100	100	100	100	90
6,3	100	100	100	100	90
5	100	100	100	100	84
2,5	100	100	100	100	84
2	100	98	98,2	100	82
1	99	94	98,5	100	78,4
0,5	98,5	86	98	100	78
0,0315	98,3	78	96	98	78
0,016	90	58	90	90	74,8
0,0815	90	90	90	90	74,8
0,08	86,8	50	88,9	86,9	74,5
0,07	86	48	88	86,5	72,8
0,05	84	48	88	86	70,8
0,0325	82,7	46,9	84,8	82,5	68,8
0,025	82	46	84,3	78	66,8
0,0175	78,9	44,9	82	74	64,5
0,0125	78,7	44,7	80	70,9	62,8
0,008	76,8	44	78,8	68,8	62,5
0,00525	74,9	42,9	78,3	64	60
0,00425	74,8	42,8	78	62	60
0,003	74,8	42,8	78	62	60
0,0015	72	42	76	58	58,5
0,00125	70	40,9	72,5	54,9	52

Tableau II. Résultats pénétromètre dynamique

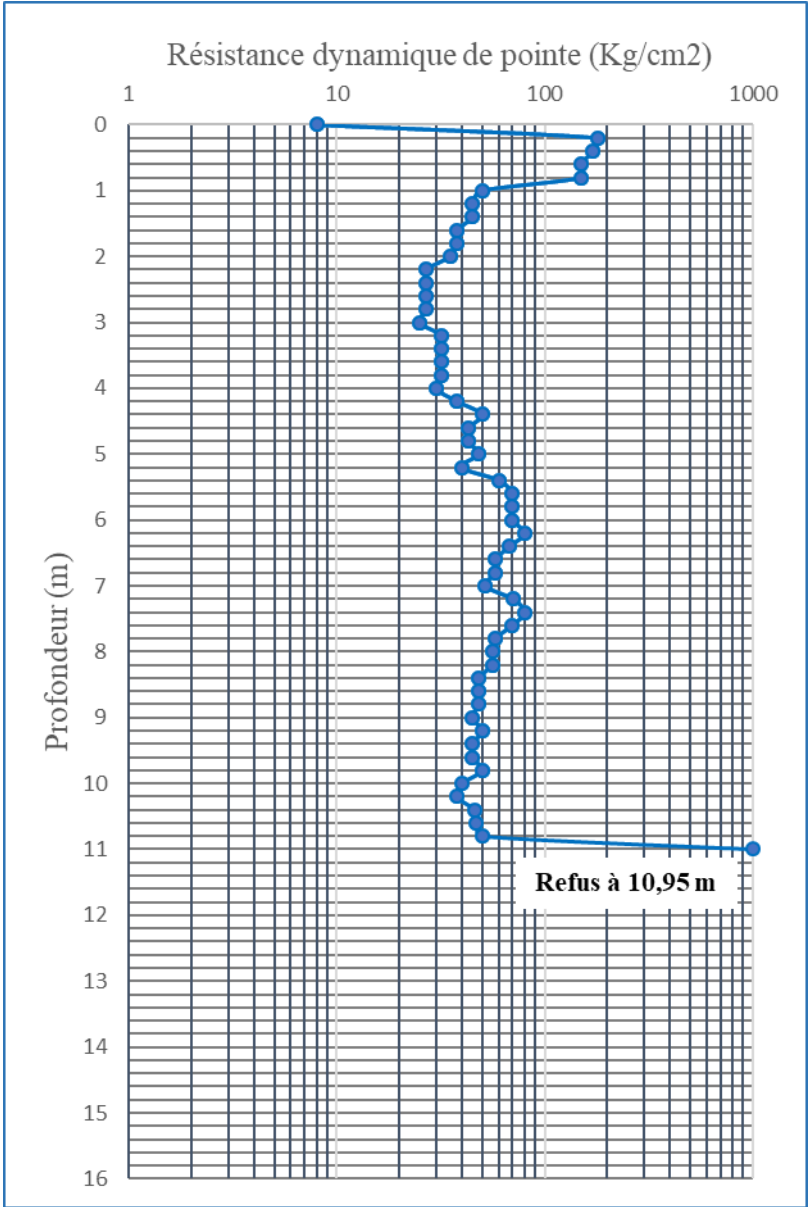
Sondages	Profondeur (m)	Résistance dynamique en pointe (Qd) en Kg/cm2	Contrainte admissible bar
PDL1	0-2	7	0,4
	2-3,40	80	4,4
	3,40-5,80	24	1,3
	5,80-7,25	74	4,1
	>7,25	100	5,6
	Refus de pénétration 7,25m de profondeur		
PDL2	0-1,40	15	0,8
	1,40-2,40	20	1,1
	2,40-5,10	13	0,7
	>5,10	100	5,6
	Refus de pénétration 5,10m de profondeur		
PDL3	0-2,20	34	1,9
	2,20-5,20	47	2,6
	5,20-7,40	54	3,0
	7,40-10,95	42	2,3
	>10,95	200	11,1
	Refus de pénétration 10,95m de profondeur		
PDL4	0-0,40	160	8,9
	0,40-2	100	5,6
	2-3,60	60	3,3
	3,60-5,20	18	1,0
	5,20-6,20	62	3,4
	6,20-7,68	90	5,0
	>7,68	200	11,1
	Refus de pénétration 7,68m de profondeur		
PDL5	0-0,80	200	11,1
	0,80-2	20	1,1
	2-4,60	49	2,7
	4,60-7,40	57	3,2
	7,40-11,04	66	3,7
	>11,04	300	16,7
	Refus de pénétration 11,04m de profondeur		
PDL6	0-0,40	157	8,7
	0,40-2	34	1,9
	2-4,60	40	2,2
	4,60-7,40	50	2,8
	7,40-10,22	52	2,9
	>10,22	200	11,1
	Refus de pénétration 10,22m de profondeur		
PDL7	0-1	130	7,2
	1-2	20	1,1
	2-3,60	58	3,2
	3,60-5,20	18	1,0
	5,20-7,20	22	1,2
	7,20-9,63	105	5,8
	>9,63	200	11,1
	Refus de pénétration 9,63m de profondeur		



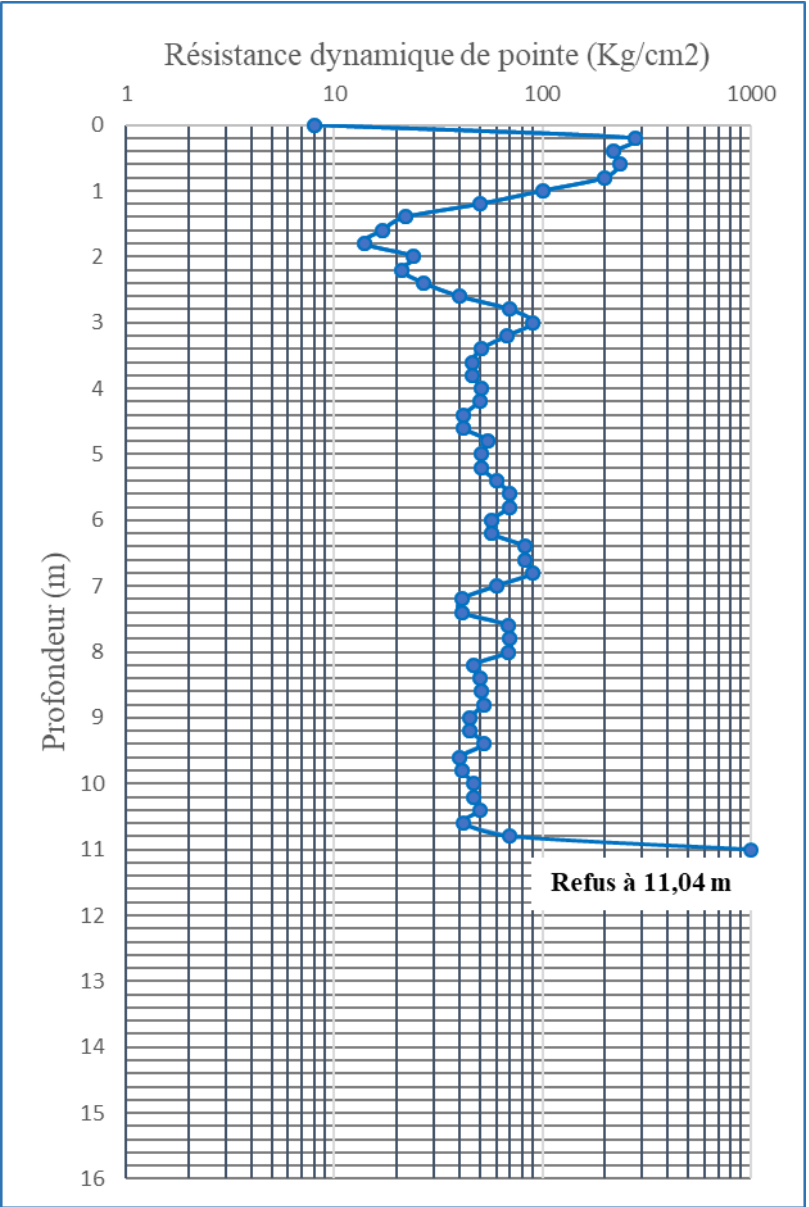
Pénétrogramme 1



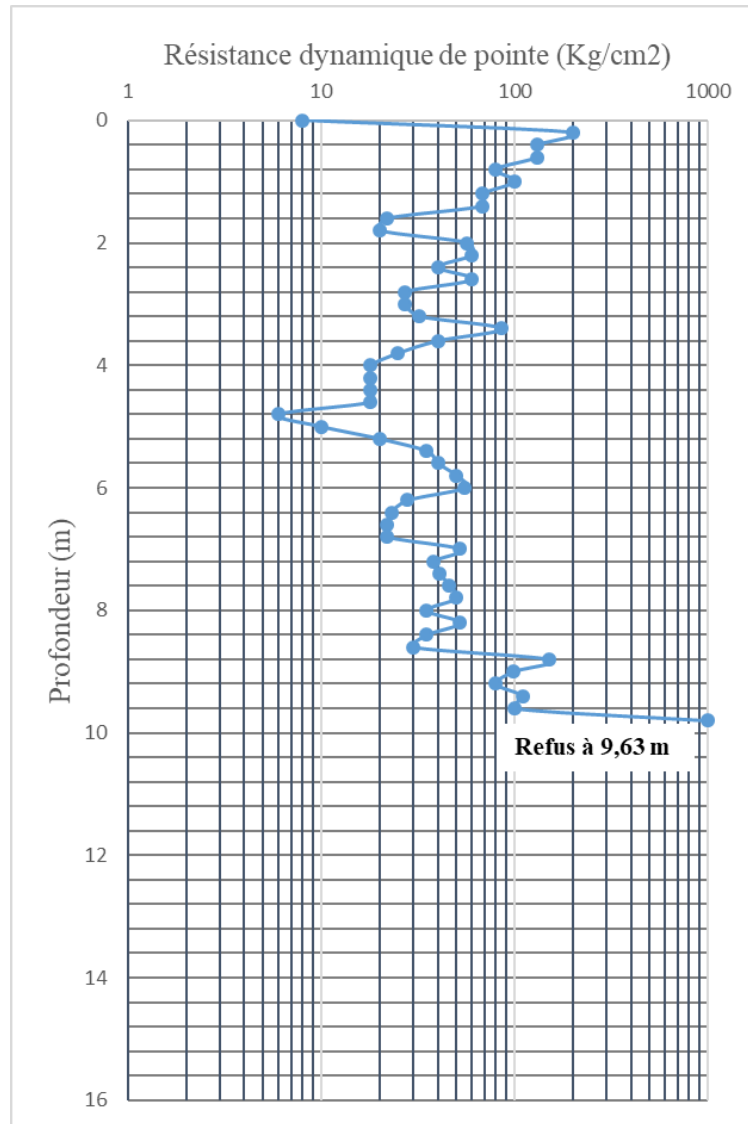
Pénétrogramme 2



Pénétrogramme 3



Pénétrogramme 5



Pénétragramme 7

Figures 1. Pénétragrammes du site



Figure 1. Vue latérale de l'ouvrage



Figure 2. Comportement du sol support de l'ouvrage



Figure 3. Observation macroscopique du sol de la zone d'étude

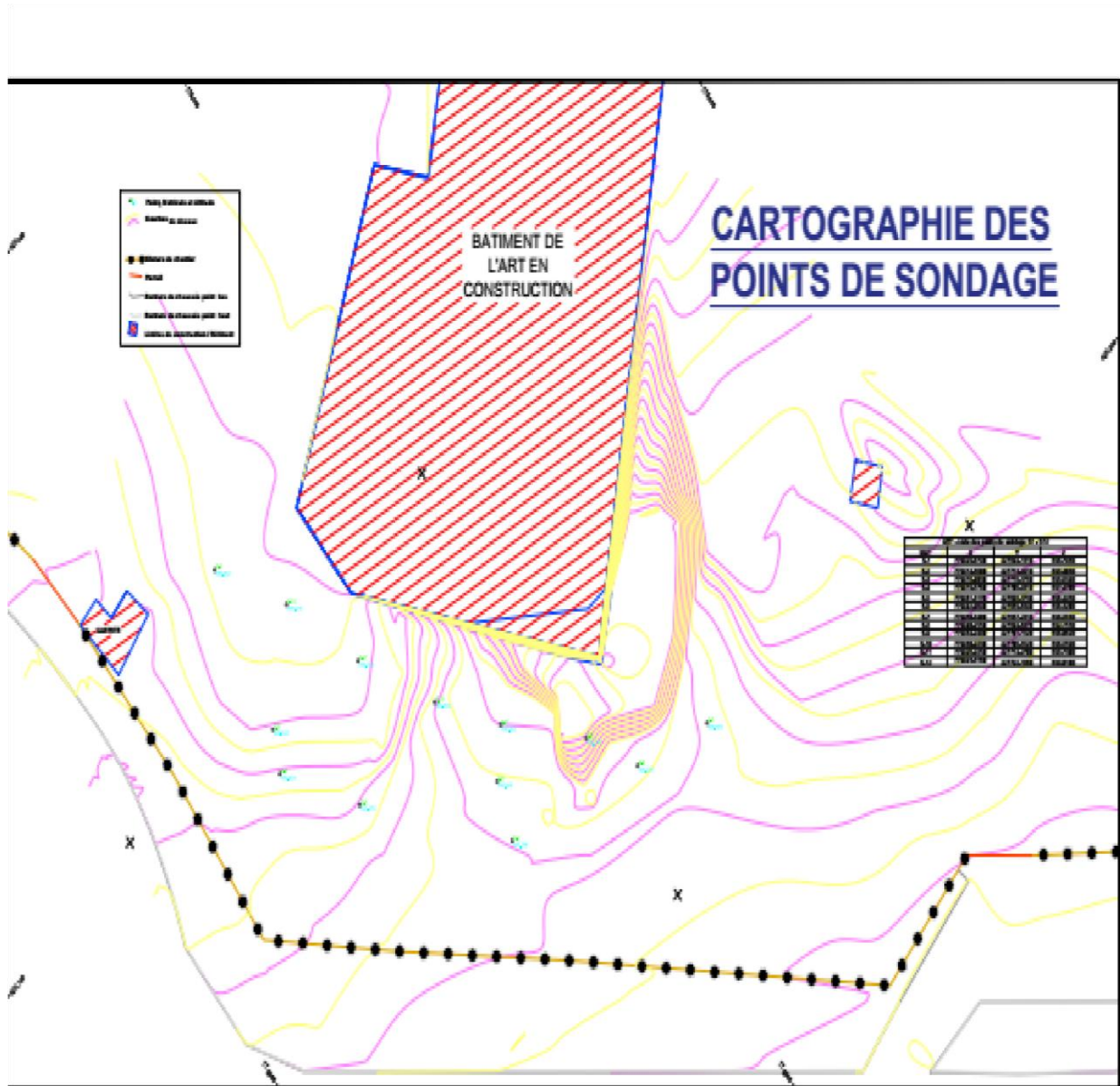
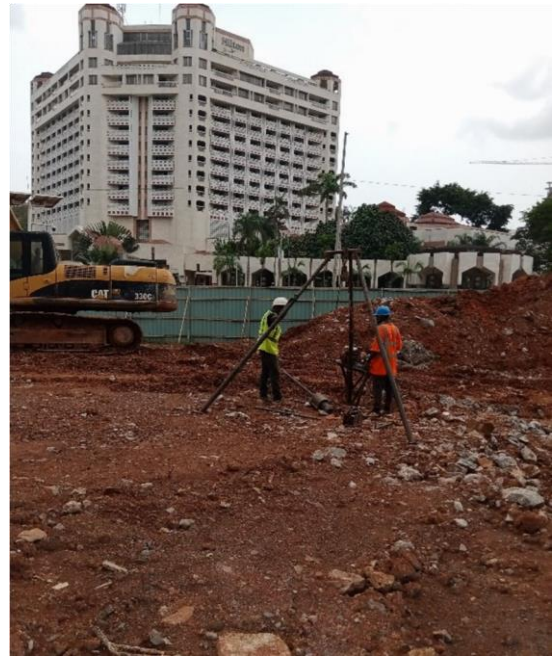


Figure 4. Plan d'implantation des essais géotechniques PDL

Annexe 3. Illustrations photographiques



Essai de pénétration dynamique de point