

PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB DE YAMOUSSOUKRO

Superficie du terrain: 1000m²

RAPPORT D'ETUDE GEOTECHNIQUE

CLIENT : SONEZERE/ SATA AFRIQUE

Indice	Missions	Date	Intitulé	Rédaction	Contrôle	Nb. Pages + Appendices
0	Mission G1-G2 (AVP)	06/08/2024	1ère Edition	S. OUATTARA	GOHOUN OUOGOU	14+11



DOSSIER LSF 24-2415

Abidjan, 06/08/2024



LABOSOL BTP-GEOTECHNIQUE
Sarl au capital de
2 000 000 FCFA

GSM: (+225) 27 22 517 117
Cel: (+225) 07 47 215 928 / 07 08 172 048
Email: labosolgeotech@gmail.com

RCCM : CI-ABJ-2018-B-11996
CC : 1824592 F
BDU-CI : CI 180 020401114279 17

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	03
	1. Missions	03
	2. Constance de la mission	04
	3. Référentiels	04
	4. Description du projet	04
	5. Changement d'implantation du projet	05
II.	PROGRAMME SPECIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE	05
	1. Les essais de penetration dynamiques lourd.....	05
	2. Les sondages pressiometriques Ménard.....	06
	3. Les coordonnées GPS des points de sondages	06
III.	SITUATION DU PROJET, TOPOGRAPHIE ET GEOLOGIE DU SITE	06
	1. Situation du projet et topographie du site	06
	2. Géologie du site	06
IV.	RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE	07
	1. Remarques liminaires	07
	2. Nature des sols rencontrés	07
	3. Caractéristiques penetrométriques	07
	4. Caractéristiques pressiometriques des sols en place	08
	5. Nappe phréatique	08
V.	SYNTHESE GEOTECHNIQUE / ADAPTATION DES OUVRAGES AU SITE.....	08
	1. Synthèse géotechnique	08
	2. Adaptation des ouvrages au site	08
VI.	ANALYSE ET ETUDE DE FONDATIONS	09
	1. Analyse de fondations	09
	2. Etude de fondations	08
	3. Disposition constructives	10
VII.	CONCLUSIONS	10
VIII.	ANNEXES	13

I. INTRODUCTION

A la demande de l'entreprise **SONEZERE/ SATA AFRIQUE**, le Laboratoire **LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE** a réalisé une étude géotechnique de type G1 et G2- AVP dans le cadre du projet de construction d'un Laboratoire à l'INPHB de Yamoussoukro.

1. Missions

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la norme NF P 94-500 des missions types d'ingénierie géotechnique de l'AFNOR (révisée en novembre 2013), qui suivent les étapes d'élaboration de tout projet, à savoir :

- **ETAPE 1 : Etudes géotechniques préalables (G1) :**
 - **Phase Etude de Site (ES)**
 - Phase Principes Généraux de Construction (PGC)
- **ETAPE 2 : Etude géotechnique de conception (G2) :**
 - **Phase Avant-Projet (AVP),**
 - Phase Projet (PRO)
 - Phase Assistance de travaux aux Contrats de Travaux (DCE/ACT).
- **ETAPE 3 : Exécution des ouvrages géotechniques**
 - Etude et suivi géotechnique d'exécution (G3),
 - Phase étude,
 - Phase suivi,
 - Supervision géotechnique d'exécution (G4) :
 - Phase supervision de l'étude d'exécution
 - Phase supervision du suivi d'exécution
- **ETAPE 4 : Etude d'éléments spécifiques géotechniques**
 - Diagnostic géotechniques (G5)

Les hypothèses prises lors de l'établissement de ce rapport s'entendent sous réserve de la stricte application de cette norme et plus généralement de l'ensemble des normes et règlements en vigueur.

L'étude géotechnique conduite sur le terrain ainsi que le présent rapport correspondent à la mission G2(AVP) dont vous trouverez en annexes, la classification, le contenu et le schéma d'enchaînement de ses missions.

2. Objectifs de la mission

Cette étude géotechnique de conception phase avant-projet (mission G1 et G2 phase AVP), conformément aux missions géotechniques de l'USG et objet de la norme NF P 94-500 (révisée en novembre 2013) a pour but de :

- définir le contexte géologique et hydrogéologique du site ;
- reconnaître les caractéristiques géotechniques des formations rencontrées sur le site ;
- mesurer le niveau de l'eau au moment des sondages ;
- définir le type de fondations envisageables pour le projet, de fournir les paramètres permettant le dimensionnement des fondations et d'évaluer les tassements prévisionnels ;
- estimer, si nécessaire, les modules élastiques des formations rencontrées conformément au DTU13.3 ;
- évaluer les conditions et les modalités de réalisation des travaux (terrassements, possibilité de réutilisation des matériaux extraits en remblais courants et en couche de forme...).

L'objectif d'une étude géotechnique d'avant-projet est d'effectuer une identification des aléas majeurs et de donner les principes généraux pour en limiter les conséquences. L'étude géotechnique d'avant-projet contribue à la mise au point de l'avant-projet de l'ouvrage en définissant les hypothèses géotechniques à prendre en compte et les principes généraux de construction pour les ouvrages géotechniques ; elle exclut toute approche des quantités, délais et coûts.

Est exclue de la mission de LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE, l'étude des voiries et des problèmes liés aux phénomènes de pollution des sols et des nappes aquifères ainsi que l'étude spécifique relative à l'assainissement (EU et EP).

3. Référentiels

Les investigations in-situ suivent les normes et documents français et plus particulièrement :

- DTU 11.1 : Cahier des charges applicables aux travaux de sondages,
- NF EN ISO 22476-2 : Essais de pénétration dynamique
- NF EN ISO 22476-4 : Sondage avec essais préssiométriques Ménard.

Le rapport du sol s'appuie sur tous les documents et réglementations en vigueur dans le domaine de la construction et plus particulièrement :

- Norme NF P 94-261 - Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles ;

4. Description du projet

Le projet consiste en la construction de bâtiments à usage de Laboratoire au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique de Yamoussoukro.

A ce stade, les plans de détails des ouvrages et les descentes de charges ne nous ont pas été communiqués.

5. Changement d'implantation du projet

Tout changement d'implantation du projet par rapport aux hypothèses prises lors de l'établissement de ce rapport doit nous être communiqué, ces changements pouvant modifier les conclusions de notre étude.

II. PROGRAMME SPECIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE

La campagne de reconnaissances effectuée du **15 /07/2024 au 18/07/2024**, a consisté en la réalisation de :

- 04 essais de pénétration dynamiques descendus à 10,00m de profondeur ou au refus,
- 04 sondages à la tarière à main descendus à 4,00m ou au refus,
- 02 sondages avec essais pressiométriques descendu à 12,00m de profondeur par rapport aux plateformes de sondages ;

1. Les essais au pénétromètre dynamique lourd

Il s'agit d'essais qualitatifs permettant entre autres, de vérifier la résistance du sol, l'homogénéité et la succession des différentes couches connues par ailleurs, la présence d'anomalies éventuelles (couche molle, blocs, vides, etc ...).

L'avancement du train de tige se fait par battage à l'aide d'un pénétromètre lourd ;

Les caractéristiques intrinsèques du pénétromètre sont les suivants :

- ✚ Masse du mouton (M).....63,5 Kg
- ✚ Hauteur de chute (H).....0,75 m
- ✚ Section droite de la pointe (S)20 cm²
- ✚ Poids de l'enclume, du guide, et du train de tiges (P) en Kg
- ✚ L'enfoncement de la pointe par nombre de coups de mouton (e) en cm.

Les sondeurs comptent le nombre de coups pour un enfoncement de 20cm. On en déduit la pénétration moyenne par coup (e en cm).

La résistance dynamique Rd est calculée par la formule classique des Hollandais et exprimée en MPa.

$$Rp = \frac{M^2 H}{S.e(M + P)}$$

Les courbes correspondantes à ces sondages sont en annexes 4 à 7.

2. Les essais pressiométriques Ménard

L'essai pressiométrique 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.

Il a été réalisé à l'aide d'une sonde standard et repartis le long de forage à la tarière (Ø63mm).

A partir des essais pressiométriques sont déterminés :

- Le module pressiométrique (E) exprimé en MPa,
- La pression de fluage (Pf), exprimée en MPa,

- La pression limite (PL tel que $PI^* = PI - P_0$), exprimée en MPa.

Ces paramètres sont reportés pour chaque essai sur les profils présentés en annexe 8.

L'analyse des résultats permet d'obtenir pour une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol. Ce qui permet d'effectuer les calculs de fondations (capacité portante et tassement)

La procédure de l'essai est celle adaptée au pressiomètre type Ménard, norme N EN ISO 22476-4.

3. Les coordonnées GPS des points de sondages

Les coordonnées GPS des points de sondages sont présentées dans le tableau ci-après :

N° Sondage	Latitude : N	Longitude : W
PD/ST1	6°52'19.93"	5°14'15.84"
PD/ST2/ SP1	6°52'20.41"	5°14'15.08"
PD/ST3/SP2	6°52'19.44"	5°14'14.69"
PD/ST4	6°52'19.99"	5°14'14.05"

III. SITUATION DU PROJET, TOPOGRAPHIE ET GEOLOGIE DU SITE

1. Situation du projet et topographie

Le projet se situe au sein de l'INPHB, dans la ville de Yamoussoukro.

Du point de vue topographique, la zone du projet est en pente.

2. Géologie

La carte géologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/1000 000ème situe le projet dans les formations dont le substratum est constitué de granites des massifs médians rajeunis, de plateforme et indifférenciés datant du précambrien moyen.



Aperçu général du site



Vue du site par Google Map

IV. RESULTATS DE LA RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE

1. Remarques liminaires

Le schéma d'implantation des sondages est donné en annexe 3.

Les profondeurs des différents ensembles lithologiques sont données par rapport à la surface du terrain relevée au moment de la réalisation des sondages.

2. Nature des sols rencontrés

Les sondages à la tarière hélicoïdale ont mis en évidence, un sous-sol constitué de sable argileux de couleurs variées (marron, jaunâtre à rougeâtre) selon la profondeur. Ces sols ont été reconnus jusqu'à 15,00m de profondeur lors du forage pressiométrique.

Observations :

Les épaisseurs relevées sont celles mesurées aux droits des sondages. Elles peuvent subir des variations entre ces points. Les lithologies décrites peuvent être approximatives compte-tenu du type de foration. De plus, l'appréciation de la limite entre les formations est rendue difficile car leurs matrices sont similaires.

3. Caractéristiques pénétrométriques des sols rencontrés

La représentation des résultats permet d'obtenir un graphique représentant la résistance dynamique de pointe (R_d) du sol testé en fonction de la profondeur.

Les résultats permettent de noter que le terrain est homogène du point de vue des valeurs de résistances dynamiques en pointe R_d .

Les valeurs des résistances dynamiques en pointe des sols en place sont comprises entre **22,9 bars** et **72,2 bars**. **Les sols en place sont peu compacts à moyennement compacts de 0 à 12,00m de profondeur.**

4. Caractéristiques pressiométriques des sols en place

Les caractéristiques du sol mesurées au pressiomètre sont le module pressiométrique E et la pression limite de rupture PL.

Les graphiques représentant E et PL en fonction de la profondeur obtenue permettent de retenir ce qui suit :

- **Sondage SP1**

Graveleux

De 0,00m à 1,00m : $PI = 7,0$ bars et $E = 105$ bars

Sols assimilables à des limons normalement consolidés de catégorie B, α égal à 0,67.

Argiles

De 1,00m à 12,00m : $4,4 \text{ bars} \leq PI \leq 22,1 \text{ bars}$ et $84 \text{ bars} \leq E \leq 384 \text{ bars}$

Sols assimilables à argiles normalement consolidées de catégorie B, α égal à 2/3.

- **Sondage SP2**

Graveleux

De 0,00m à 1,00m : $PI = 8,0$ bars et $E = 93$ bars

Sols assimilables à des limons normalement consolidés de catégorie B, α égal à 0,67.

Argiles

De 1,00m à 12,00m : $5,0 \text{ bars} \leq PI \leq 16,6 \text{ bars}$ et $56 \text{ bars} \leq E \leq 279 \text{ bars}$

Sols assimilables à argiles normalement consolidées de catégorie B, α égal à 2/3.

5. Nappe phréatique

Aucune venue d'eau n'a été rencontrée sur le site aux droits de nos sondages et essais (Août 2024).

Il s'agit d'une observation ponctuelle. La rencontre d'éventuelles arrivées d'eau n'est pas à exclure.

V. SYNTHÈSE GEOTECHNIQUE / ADAPTATION DES OUVRAGES AU SITE

1. Synthèse géotechnique

Les investigations réalisées au droit du site du projet ont permis de mettre en évidence un sous-sol constitué de limons et argiles de couleurs variées selon la profondeur.

Ces sols sont assimilables à des **limons et argiles normalement consolidées de catégorie B** selon la classification de Ménard.

Aucune venue d'eau n'a été rencontrée sur le site aux droits de nos sondages et essais (Août 2024).

La nature des formations rencontrées aux droits de nos sondages ne montre aucune amorce de décompression. La lithologie relevée aux droits des sondages correspond aux faciès généralement observés dans la zone.

2. Adaptation des ouvrages au site

Il est projeté la construction de bâtiment à usage de Laboratoire à Yamoussoukro, au sein de l'INPHB.

Compte-tenu de la nature des formations mises en évidence, de leurs caractéristiques mécaniques, hydrogéologiques et des caractéristiques du projet, il peut être envisagé des fondations superficielles sur semelles isolées.

VI. ANALYSE ET ETUDE DE FONDATIONS

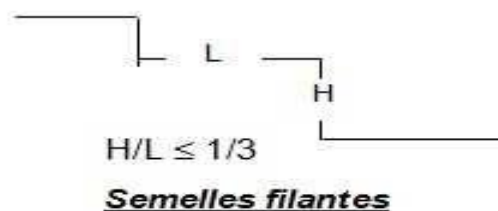
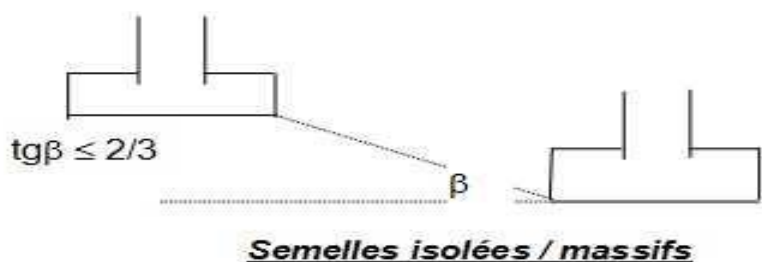
1. Analyse de fondations

Compte-tenu de la nature et de la résistance des sols rencontrés, on peut envisager fonder le bâtiment en projet sur des fondations superficielles de type semelles (isolées et filantes).

a. Forme, dimension et niveau d'assise

On veillera à respecter les critères suivants :

- Pour des raisons de stabilité, la largeur de ces semelles ne pourra être inférieure à 0,40m et sera suffisante pour limiter les contraintes sous celles-ci,
- Respect des règles sur les fondations à niveaux décalés, y compris vis-à-vis des mitoyens,



2. Etudes de fondations

Les calculs de fondations se feront à partir des résultats de sondages avec essais préssiométriques SP1 conformément au fascicule 62 Titre V (Voir Annexe).

Les calculs seront effectués à partir du logiciel GEOFOND v1.22.

On considère en fondation du Laboratoire en projet, des semelles isolées 1,00x1,00m , ancrées à 1,50m de profondeur par rapport aux plateformes de sondages.

a. Contrainte admissible des sols sous les semelles

Les capacités portantes des fondations superficielles aux états limites (ELS et ELU) sous charge verticale centrée sont définies de la façon suivante :

$$q_a = \sigma_{vo} + (K \times P_{le^*})/3$$

$$q_c = \sigma_{vo} + (K \times P_{le^*})/2$$

Avec q_a : capacité portante à l'état limite de Service (ELS)

q_c : capacité portance à l'état limite ultime (ELU)

σ_{vo} : contrainte totale effective au niveau de la base de la fondation (après travaux)

K_p : Facteur de portance

P_{le^*} : Pression limite nette équivalente

b. Evaluation des tassements des sols sous les semelles

Le tassement d'une fondation superficielle rigide est donné par la formule suivante :

$$s = \left[\frac{2}{9 \cdot E_d} B_o \left(\lambda_d \cdot \frac{B}{B_o} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{9 \cdot E_s} \lambda_s \cdot B \right] (q - q_o)$$

Avec B = largeur de la semelle

B_o = largeur de référence pris égal à 60 cm

α = coefficient de structure du sol ($\alpha = 2/3$)

q = contrainte appliquée

E_s, E_d = modules pressiométriques équivalents correspondant aux domaines sphérique et déviatorique du sol

λ_d, λ_s = coefficients de forme de la semelle.

Selon les calculs par traitement informatique en annexe 9, les valeurs des taux de travail des sols et des tassements correspondant sous semelles pour des profondeurs d'ancrage à 1,50m de profondeur par rapport aux plateformes de sondages sont données dans les tableaux ci-dessous :

Semelles isolées	1.00m x 1.00m
Nature des sols de fondations	Graveleux latéritique rougeâtre
Profondeur d'ancrage (m) / Plateforme de construction	1,50
Capacités portantes à l'ELS (MPa)	0,17
Capacités portantes à l'ELU (MPa)	0,25
Tassement (mm)	4,0

3. Dispositions constructives

- ✓ Il revient à l'Ingénieur Structure de préciser, une fois le projet établi, la limite acceptable de tassement vis-à-vis de la structure et des dallages, ce qui amènera à redéfinir éventuellement la contrainte q_{ELS} , voire les principes de fondations et de niveaux bas.
- ✓ L'entreprise s'assurera de l'homogénéité de nature et de consistance des sols d'assise.

Lors de la réalisation des fondations, il conviendra :

- En cas d'instabilité des parois des fouilles, de prévoir un confortement adapté (blindage...);
 - De nettoyer soigneusement les fonds de fouilles (curage au godet lisse), et de bétonner immédiatement après nettoyage ou mettre en œuvre un béton de propreté ; en aucun les fouilles ne seront laissées exposées aux intempéries.
- ✓ Toute anomalie détectée lors des terrassements devra nous être signalée afin de définir, en collaboration avec la Maîtrise d'œuvre et dans le cadre d'une mission complémentaire, les solutions envisageables.

VII. CONCLUSIONS

La présente étude géotechnique a permis de définir la nature et la résistance des sols en place et de faire une analyse de fondations du Laboratoire à Yamoussoukro au sein de l'INPHB.

Les sondages à la tarière hélicoïdale réalisés ont mis en évidence la présence d'un sous-sol constitué de graveleux latéritiques de couleur rougeâtre sur le premier mètre et des argiles d'altération en profondeur.

Aucune venue d'eau n'a été rencontrée sur le site aux droits de nos sondages et essais (Août-2024).

Les sols en place sont peu compacts à moyennement compacts avec des résistances dynamiques R_d comprises entre 21,4 bars et 136,0 bars.

Les valeurs de pression limite sont comprises entre 4,4 bars et 22,1 bars et celles du module pressiométrique sont comprises entre 84 bars et 385 bars de 0 à 12,00 m de profondeur.

- Fondation du Bâtiment Laboratoire

Dans le cadre du pré-dimensionnement des ouvrages en fondation, une analyse faite dans le cas de semelles isolées de 1,00m de côté, ancrés à 1,50 de profondeur par rapport aux plateformes de sondages a permis de retenir une capacité portante des fondations à l'ELS de 0,17MPa (1,7 bar), à l'ELU de 0,25MPa (2,5 bars) avec des tassements de l'ordre de centimètre.

NB : Notre mission G1 et G2-AVP se termine à la remise du présent rapport.

Recommandation

- Dans le cas d'une extension de missions (contrôle de fond de fouilles, sondages complémentaires, note complémentaire ou une modification du projet), celle-ci donnerait lieu à l'établissement d'un procès-verbal et d'une facturation distincte de la présente étude ; le règlement de cette facture est obligatoire et assujetti au démarrage des travaux.
- **La non-observation de cette réglementation ne saurait engagée la responsabilité du laboratoire LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE.**

Nous restons à la disposition du Maître d'ouvrage et de tous les intervenants pour tous renseignements complémentaires.

Le Directeur Général

GOHOUN OUOGOU
Ingénieur des T.P, Ingénieur Conseil

N.B : Le présent rapport reste valable sous réserve des observations importantes ci-après.

LABOSOL BTP-GEOTECHNIQUE**OBSERVATIONS IMPORTANTES**

1. Le présent rapport et ses annexes constituent un ensemble indissociable. La mauvaise utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle sans l'accord écrit de LABOSOL BTP-GEOTECHNIQUE ne saurait engager la responsabilité de celui-ci.
2. Des changements dans l'implantation, la conception ou l'importance des constructions par rapport aux données de la présente étude, peuvent conduire à modifier les conclusions et prescriptions du Rapport et doivent, par conséquent, être portés à la connaissance de LABOSOL BTP-GEOTECHNIQUE.

De même, des éléments nouveaux mis en évidence lors de l'exécution des fondations et n'ayant pu être détectés au cours des opérations de reconnaissance (par exemple: hétérogénéité localisée, venue d'eau, etc...) peuvent rendre caduque tout ou partie des conclusions du Rapport.

Ces éléments nouveaux ainsi que tout incident important survenant en cours des travaux (glissement de talus, éboulement des fouilles, dégâts occasionnés aux constructions existantes, etc...) doivent être immédiatement signalés à LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE pour lui permettre de considérer et d'adapter éventuellement les solutions initialement préconisées.

LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE ne saurait être rendu responsable des modifications apportées à son étude que dans la mesure où il aurait donné, par écrit, son accord sur les dites modifications.

3. Il est vivement recommandé au client de faire procéder, au moment de l'ouverture des fouilles ou de la réalisation des premiers pieux, à une visite de chantier par un spécialiste de LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE. Cette visite a pour objet de vérifier que la nature des sols et la profondeur de l'horizon de fondation sont conformes aux données de l'étude. Elle donne lieu à l'établissement d'un procès-verbal et d'une facturation distincte de la présente étude.
4. La non-observation des recommandations citées au paragraphe 3 ne saurait engagée la responsabilité du Laboratoire LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE.

ANNEXES

Annexe 1 : Qualifications générales

Annexe 2 & 3 : Classification des missions géotechniques

Annexes 4 à 7 : Résultats graphiques des de pénétration dynamique

Annexe 8 & 9 : Résultats graphiques des essais de pressiomètre Ménard

Annexe 10 : Note de calculs

Annexe 11 : Photographie de l'équipe de sondages

ANNEXE 1 : QUALIFICATIONS GENERALES

1. Cadre de la mission

Par référence à la norme NF P 94-500 sur les missions d'ingénierie géotechnique (en particulier extrait de 2 pages du chapitre 4 joint à toute offre et à tout rapport), il appartient au maître d'ouvrage et à son maître d'œuvre de veiller à ce que toutes les missions d'ingénierie géotechnique nécessaires à la conception puis à l'exécution de l'ouvrage soient engagées avec les moyens opportuns et confiées à des hommes de l'Art.

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique suit la succession des phases d'élaboration du projet, chacune de ces missions ne couvrant qu'un domaine spécifique de la conception ou de l'exécution.

En particulier :

- Les missions d'études géotechniques préalables (étude de site G1 ES, étude des Principes Généraux de Construction G1 PGC), Les missions d'études géotechniques de conception (étude d'avant-projet G2 AVP, étude de projet G2 PRO et étude G2 DCE/ACT), Les missions étude et suivi géotechniques d'exécution (G3), de supervision géotechnique d'exécution (G4) sont réalisées dans l'ordre successif.
- Exceptionnellement, une mission confiée à notre société peut ne contenir qu'une partie des prestations décrites dans la mission type correspondante après accord explicite, le client confiant obligatoirement le complément de la mission à un autre prestataire spécialisé en ingénierie géotechnique.
- L'exécution d'investigations géotechniques engage notre société uniquement sur la conformité des travaux exécutés à ceux contractuellement commandés et sur l'exactitude des résultats qu'elle fournit.
- Toute mission d'ingénierie géotechnique n'engage notre société sur son devoir de conseil que dans le cadre strict, d'une part, des objectifs explicitement définis dans notre proposition technique sur la base de laquelle la commande et ses avenants éventuels ont été établis, d'autre part, du projet du client décrit par les documents graphiques ou plans cités dans le rapport.
- Toute mission d'étude géotechnique préalable G1 phase ES ou PGC, d'étude géotechnique de conception G2 AVP, ou de diagnostic géotechnique exclut tout engagement de notre société sur les quantités, coûts et délais d'exécution des futurs ouvrages géotechniques. De convention expresse, la responsabilité de notre société ne peut être engagée que dans l'hypothèse où la mission suivante d'étude géotechnique de projet lui est confiée.
- Une mission d'étude géotechnique de conception G2 AVP, de projet G2 PRO et G2 DCE/ACT engage notre société en tant qu'assistant technique à la maîtrise d'œuvre dans les limites du contrat fixant l'étendue de la mission et la (ou les) partie(s) d'ouvrage(s) concerné(s).

La responsabilité de notre société ne saurait être engagée en dehors du cadre de la mission d'ingénierie géotechnique objet du rapport. En particulier, toute modification apportée au projet ou à son environnement nécessite la réactualisation du rapport géotechnique dans le cadre d'une nouvelle mission.

2. Recommandations

Il est précisé que l'étude géotechnique repose sur une investigation du sol dont la maille ne permet pas de lever la totalité des aléas toujours possibles en milieu naturel. En effet, des hétérogénéités, naturelles ou du fait de l'homme, des discontinuités et des aléas d'exécution peuvent apparaître compte tenu du rapport entre le volume échantillonné ou testé et le volume sollicité par l'ouvrage, et ce d'autant plus que ces singularités éventuelles peuvent être limitées en extension. Les éléments géotechniques nouveaux mis en évidence lors de l'exécution, pouvant avoir une influence sur les conclusions du rapport, doivent immédiatement être signalés à l'ingénierie géotechnique chargée de l'étude et suivi géotechniques d'exécution (mission G3) afin qu'elle en analyse les conséquences sur les conditions d'exécution voire la conception de l'ouvrage géotechnique.

Si un caractère évolutif particulier a été mis en lumière (notamment glissement, érosion, dissolution, remblais évolutifs, tourbe), l'application des recommandations du rapport nécessite une validation à chaque étape suivante de la conception ou de l'exécution. En effet, un tel caractère évolutif peut remettre en cause ces recommandations notamment s'il s'écoule un laps de temps important avant leur mise en œuvre.

3. Rapport de la mission

Le rapport géotechnique constitue le compte-rendu de la mission d'ingénierie géotechnique définie par la commande au titre de laquelle il a été établi et dont les références sont rappelées en tête. A défaut de clauses spécifiques contractuelles, la remise du rapport géotechnique fixe la fin de la mission.

Un rapport géotechnique et toutes ses annexes identifiées constituent un ensemble indissociable. Les deux exemplaires de référence en sont les deux originaux conservés : un par le client et le second par notre société. Dans ce cadre, toute autre interprétation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle ne saurait engager la responsabilité de notre société. En particulier l'utilisation même partielle de ces résultats et conclusions par un autre maître d'ouvrage ou par un autre constructeur ou pour un autre ouvrage que celui objet de la mission confiée ne pourra en aucun cas engager la responsabilité de notre société et pourra entraîner des poursuites judiciaires.

Extrait de la norme NF P 94-500 révisée en novembre 2013

Classification et enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique

Le Maître d'Ouvrage doit associer l'ingénierie géotechnique au même titre que les autres ingénieries à la Maîtrise d'Œuvre et ce, à toutes les étapes successives de conception, puis de réalisation de l'ouvrage. Le Maître d'Ouvrage, ou son mandataire, doit veiller à la synchronisation des missions d'ingénierie géotechnique avec les phases effectives à la Maîtrise d'Œuvre du projet.

L'enchaînement et la définition synthétique des missions d'ingénierie géotechnique sont donnés dans les tableaux 1 et 2.

Deux ingénieries géotechniques différentes doivent intervenir : la première pour le compte du Maître d'Ouvrage ou de son mandataire lors des étapes 1 à 3, la seconde pour le compte de l'entreprise lors de l'étape 3.

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Etude géotechnique préalable (G1)		Etude géotechnique préalable (G1) Phase Etude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Etude préliminaire, Esquisse, APS	Etudes géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonctions des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Etude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Etude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Etudes géotechniques de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Etude géotechnique de conception (G2) Phase DCE/ACT		Consultation sur le projet de base/choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Etudes géotechniques de réalisation (G3/G4)		A la charge de l'entreprise	A la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Etude de suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Etude (en interaction avec la phase suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase supervision du suivi)	Etude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
	DET/AOR	Etude et suivi géotechniques d'exécutions (G3) Phase Suivi (en interaction avec la Phase Etude)	Géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage		Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
A toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

Tableau 2 – Classification des missions d'ingénierie géotechnique

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

ETAPE 1 : ETUDE GEOTECHNIQUE PREALABLE (G1)

Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :

Phase Étude de Site (ES)

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.

- Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

Phase Principes Généraux de Construction (PGC)

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.

- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols).

ETAPE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)

Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :

Phase Avant-projet (AVP)

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.

- Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques.

Phase Projet (PRO)

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site. - Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.

- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités.

Phase DCE / ACT

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel).

- Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participé à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

ETAPE 3 : ETUDES GEOTECHNIQUES DE REALISATION (G3 et G4, distinctes et simultanées) ETUDE ET SUIVI GEOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)

Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.

- Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques: notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).

- Élaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase Étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Établir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO)

SUPERVISION GEOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)

Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Supervision de l'étude d'exécution

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

Phase Supervision du suivi d'exécution

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- Donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis pour le DIUO.

DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE (G5)

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

IMPLANTATION DES POINTS DE SONDAGES



PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB

● POINTS DE SONDAGES GEOTECHNIQUES

PD : Essais de pénétration dynamique

ST : Sondage à la Tarière à main

SP : Sondage pour essais au pressiomètre Ménard

N° DOSSIER : LSF 24-2415

DATE : 06/08/2024

SONDAGES ET ESSAIS AU PENETROMETRE DYNAMIQUE

Effectué conformément à la norme ISO 22476-2- Edition 2005

TYPE DE SONDAGE : TARIERE MANUELLE

PENETROMETRE

DYNAMIQUE LEGER

X DYNAMIQUE LOURD

STATIQUE

NAPPE : NEANT

MISE EN STATION SUR : Terrain en place

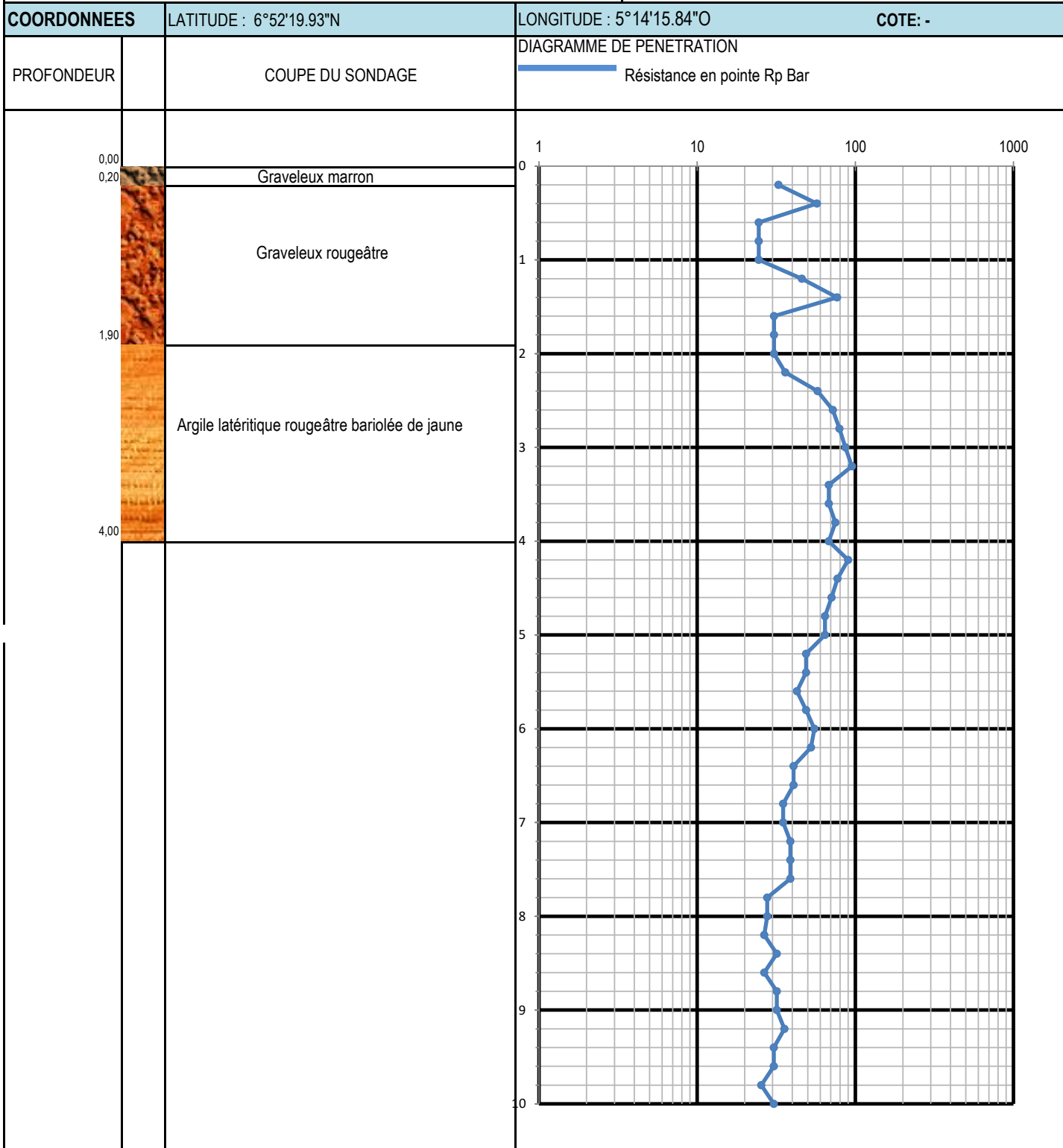
PROJET : **PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB DE YAMOOUSSOUKRO**

CLIENT: **SONEZERE/ SATA AFRIQUE**

ESSAI N° PD/ST1

DOSSIER : **LSF 24-2415**

DATE : **15/07/2024**



OBSERVATION

SONDEUR

YAPI

SONDAGES ET ESSAIS AU PENETROMETRE DYNAMIQUE

Effectué conformément à la norme ISO 22476-2- Edition 2005

TYPE DE SONDAGE : TARIERE MANUELLE

PENETROMETRE

DYNAMIQUE LEGER

☒ **DYNAMIQUE LOURD**

STATIQUE

NAPPE : NEANT

MISE EN STATION SUR : Terrain en place

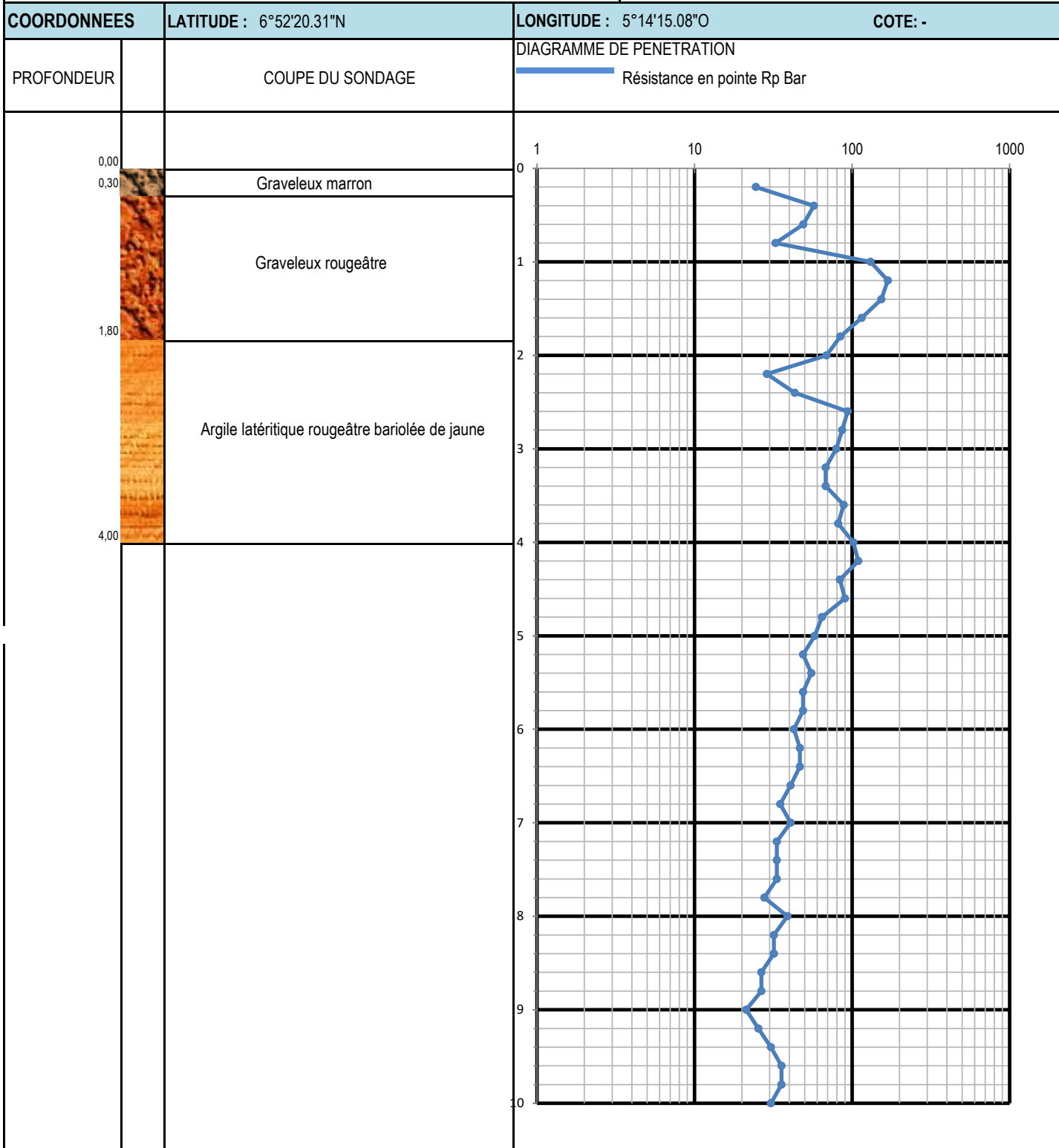
PROJET : **PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB DE YAMOUSSOUKRO**

CLIENT: **SONEZERE/ SATA AFRIQUE**

ESSAI N° PD/ST2

DOSSIER : **LSF 24-2415**

DATE : **15/07/2024**



OBSERVATION

SONDEUR

YAPI

SONDAGES ET ESSAIS AU PENETROMETRE DYNAMIQUE

Effectué conformément à la norme ISO 22476-2- Edition 2005

TYPE DE SONDAGE : TARIERE MANUELLE

PENETROMETRE

DYNAMIQUE LEGER

X DYNAMIQUE LOURD

STATIQUE

NAPPE : NEANT

MISE EN STATION SUR : Terrain en place

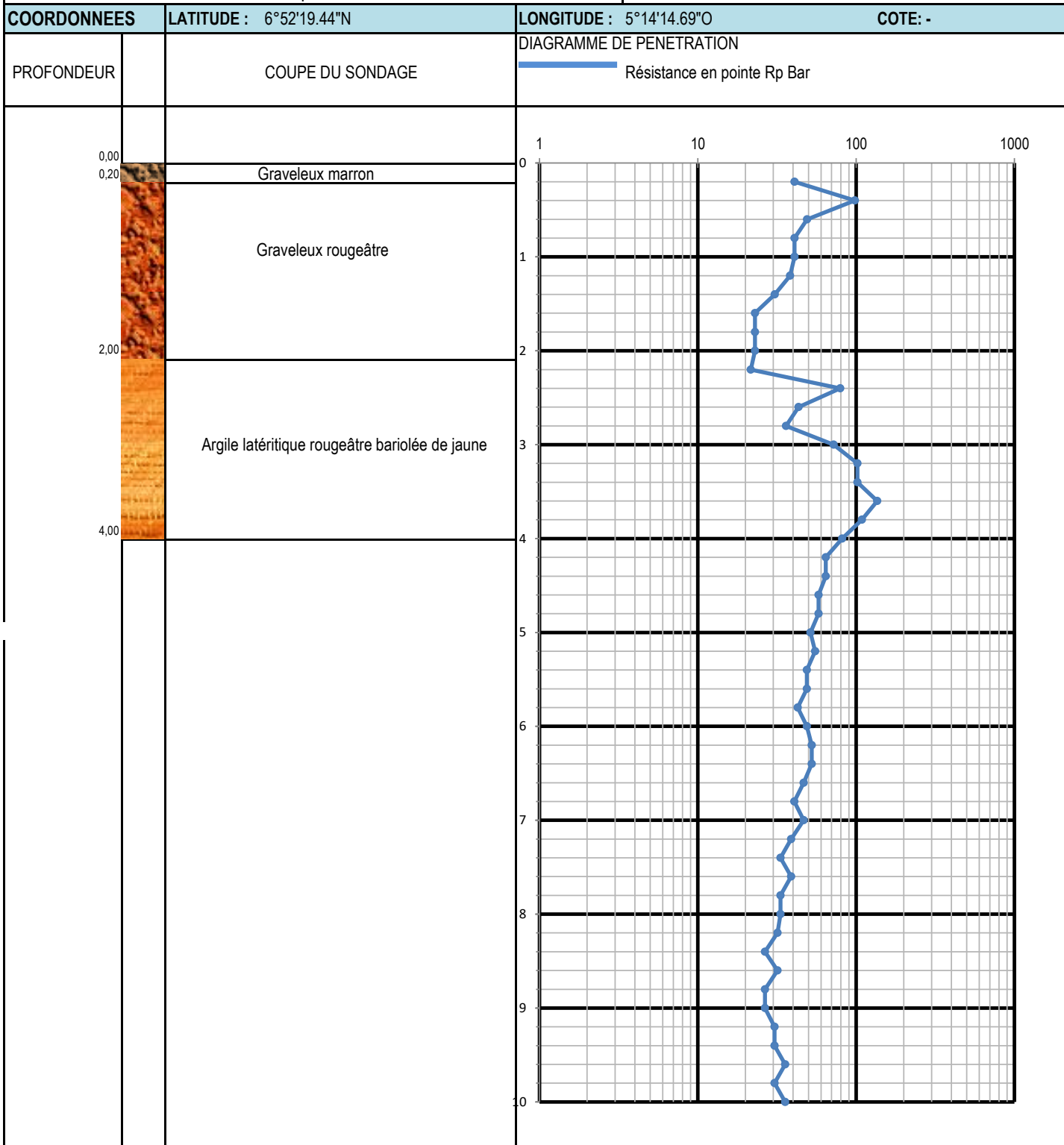
PROJET : **PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB DE YAMOUSSOUKRO**

CLIENT: **SONEZERE/ SATA AFRIQUE**

ESSAI N° PD/ST3

DOSSIER : LSF 24-2415

DATE : 15/07/2024



OBSERVATION

SONDEUR

YAPI

TYPE DE SONDAGE : TARIERE MANUELLE

PENETROMETRE

DYNAMIQUE LEGER

X DYNAMIQUE LOURD

STATIQUE

NAPPE : NEANT

MISE EN STATION SUR : Terrain en place

PROJET : **PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT MINIER A L'INP-HB DE YAMOUSSOUKRO**

CLIENT: **SONEZERE/ SATA AFRIQUE**

ESSAI N° PD/ST4

DOSSIER : LSF 24-2415

DATE : 15/07/2024

COORDONNEES

LATITUDE : 6°52'19.99"N

LONGITUDE : 5°14'14.05"O

COTE: -

PROFONDEUR

COUPE DU SONDAGE

DIAGRAMME DE PENETRATION

Résistance en pointe Rp Bar

0,00
0,20

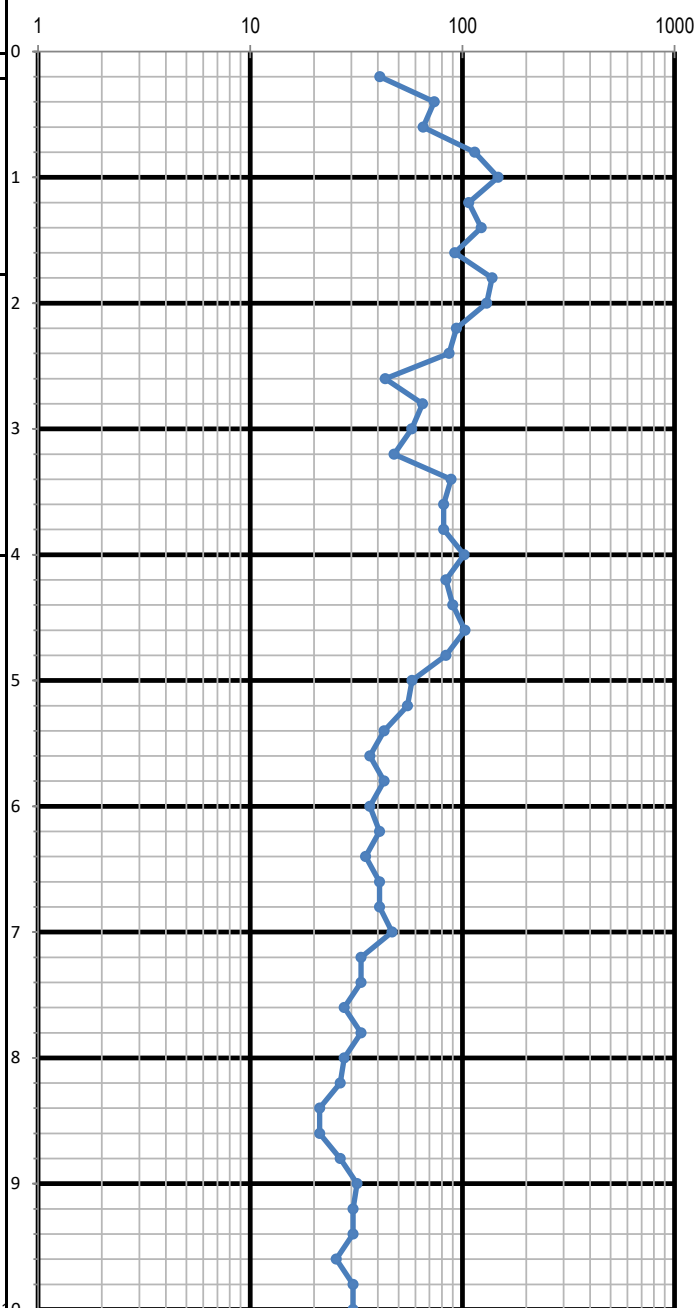
Graveleux marron

Graveleux rougeâtre

1,70

Argile latéritique rougeâtre bariolée de jaune

4,00



OBSERVATION

SONDEUR

YAPI

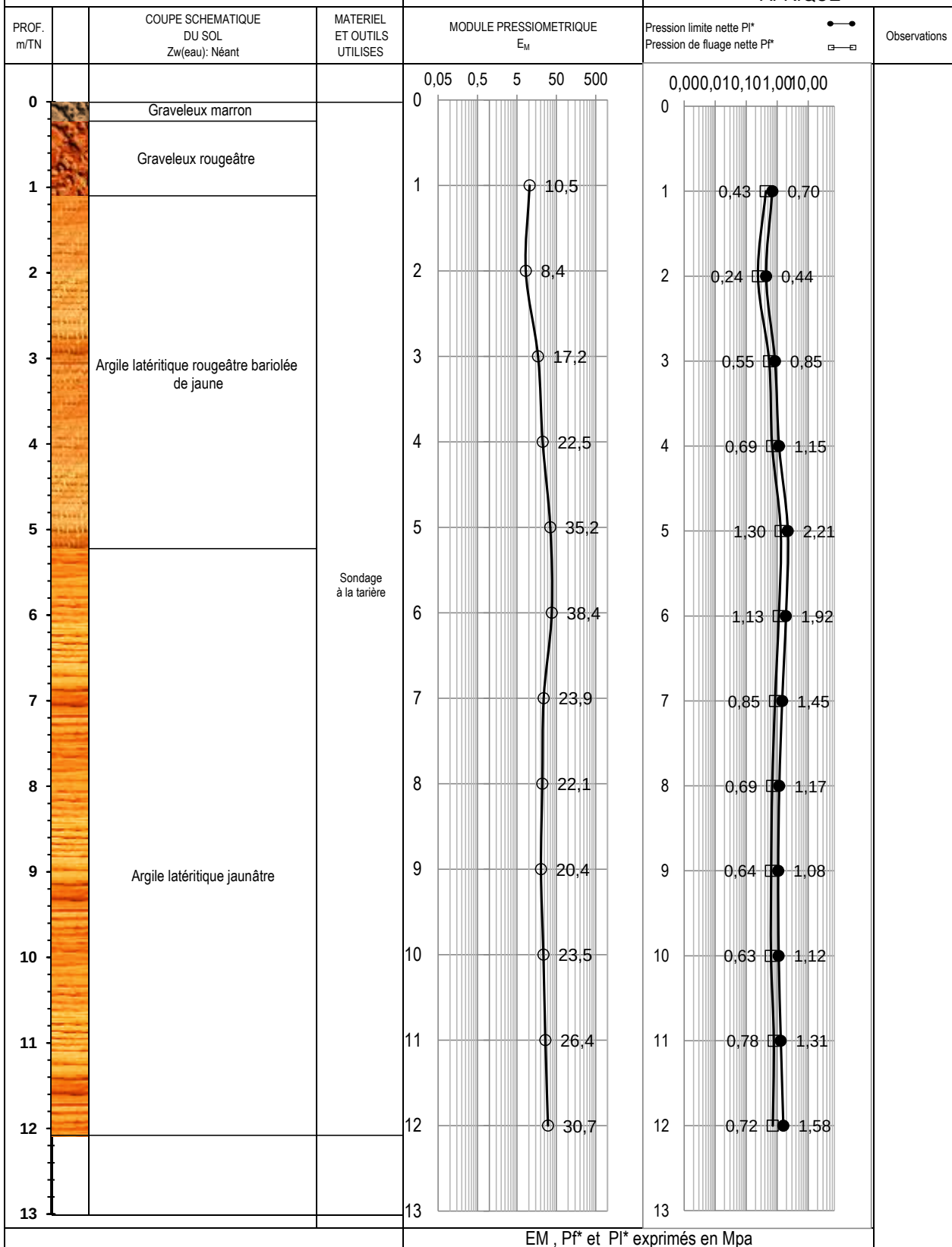
SONDAGE PRESSIOMETRIQUE MENARD

Effectué conformément à la norme ISO 22476 - 4 Edition 2021

DOSSIER N°: LSF 24-2415

SONDAGE: SP1

CLIENT: SONEZERE/ SATA
AFRIQUE



SONDEUR :

Diamètre de forage : 63 mm

OBSERVATIONS : Néant

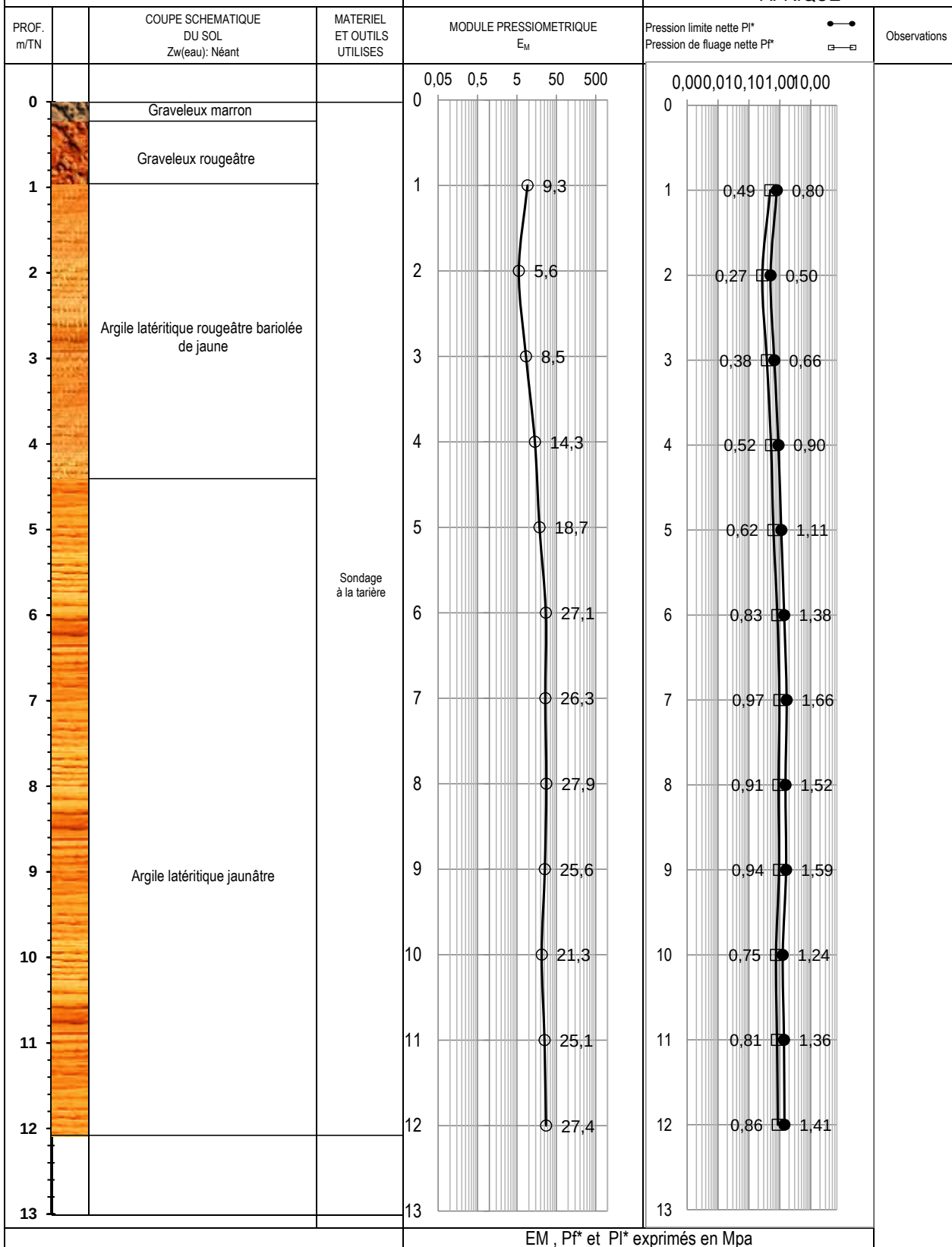
SONDAGE PRESSIOMETRIQUE MENARD

Effectué conformément à la norme ISO 22476 - 4 Edition 2021

DOSSIER N°: LSF 24-2415

SONDAGE: SP2

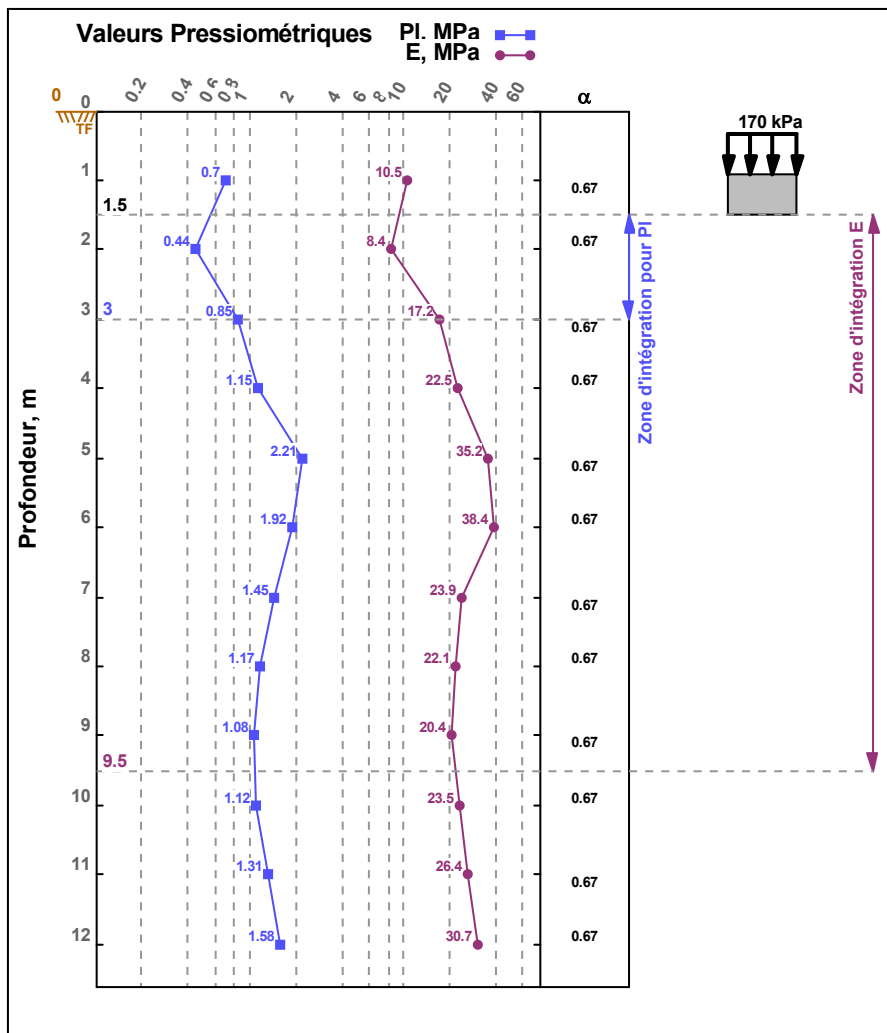
CLIENT: SONEZERE/ SATA
AFRIQUE



SONDEUR :

Diamètre de forage : 63 mm

OBSERVATIONS : Néant



Fondation : Semelle carrée

Côté : 1 m

Aire : 1 m²

Encastrement : 1.5 m

Base de la fondation : 1.5 m

Paramètres des sols

Type de sol sous la fondation :

Argiles et limons B

Poids des terres au-dessus de la fondation :

après travaux = 18 kN/m³

avant travaux = 18 kN/m³

Contrainte verticale finale q'_0 : 27 kPa (calculée)

Contrainte verticale initiale σ'_{v0} : 27 kPa (calculée)

$\alpha = 0.674$ (calculé)

Fichier : PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT



GEOFOND© V1.22 du 01/08/2018 développé par GEOS
site web : <http://www.geos.fr> e-mail : logiciels@geos.fr

GEOS Ingénieurs Conseils, 310 Avenue Marie Curie
Bât. Europa 2, Archamps Technopole, 74160 ARCHAMPS

Tél : 04 50 95 38 14
Fax : 04 50 95 99 36

Données :

N°	Etat-limite	q' (kPa)	δ (°)	V_d (kN)	H_d (kN)
1	ELS	170	0	170	0

Capacité portante suivant le fascicule 62-TitreV :

N°	q_{min} (kPa)	q_{max} (kPa)	q_{ref} (kPa)	D_e (m)	k_p	p_{le} (MPa)	$i_{\delta\beta}$	B_c (m)	q_u (kPa)	C.P. (kPa)
1	170	170	170	2.01	1.36	0.57	1	1	804	286 vérifié

Tassements suivant le fascicule 62-TitreV :

N°	q_{ref} (kPa)	E_c (MPa)	E_d (MPa)	λ_c	λ_d	S_c (cm)	S_d (cm)	S_f (cm)
1	170	8.84	12.4	1.1	1.12	0.132	0.235	0.367

08/08/2024 17:01

PROJET DE CONSTRUCTION DU LABORATOIRE MINES ET ENVIRONNEMENT Page 11

LABOSOL
BTP - Géotechnique

FIGURE

Résultats détaillés : capacité portante

ELS,

$q = 170 \text{ kPa}$, $\delta = 0^\circ$, $e = 0 \text{ m}$, $Hd = 0 \text{ kN}$, $Vd = 170 \text{ kN}$, $Mx = 0 \text{ kN.m}$

$q_{\min} = Vd/A * (1-6*e/B) = 0.17 \text{ MPa}$; $q_{\max} = Vd/A * (1+6*e/B) = 0.17 \text{ MPa}$

$q_{\text{ref}} = (3.q_{\max} + q_{\min}) / 4 = 0.17 \text{ MPa}$

Par la méthode du Fascicule 62

$$P_{le}^* = \exp\left(\ln(10) / \left(\frac{D + 1.5 B}{D}\right) \int_D^{\infty} \log(P_{le}^*(z)).dz\right) = 0.57 \text{ MPa}$$

$$D_e = 1/P_{le}^* \int_D^{\infty} P_{le}^*(z).dz = 2.01 \text{ m}$$

$$q'_0 = \gamma.D - \gamma_e.Z_e = 27 \text{ kPa}$$

$$k_p = 0.8(1 + 0.35(0.6 + 0.4 B/L)(D_e/B)) = 1.36$$

$$i_{\delta\beta} = (1 - \delta/90)^2 = 1$$

$$q'_u = k_p.P_{le}^* + q'_0 = 0.804 \text{ MPa}$$

$$\text{Capa. Port.} = (q'_u - q'_0).i_{\delta\beta} / 3 + q'_0 = 0.286 \text{ MPa}$$

Résultats détaillés : tassement

ELS,

$q = 170 \text{ kPa}$, $\delta = 0^\circ$, $e = 0 \text{ m}$, $Hd = 0 \text{ kN}$, $Vd = 170 \text{ kN}$, $Mx = 0 \text{ kN.m}$

Par la méthode du Fascicule 62

$$\sigma'_{v0} = \gamma.Z - \gamma_e.Z_e = 27 \text{ kPa}$$

$$E_i = (B/2) / \int_{D + (i-1)B/2}^{D + iB/2} 1/E(z).dz$$

$$E_{i,j} = (j - i + 1) / (1/E_i + \dots + 1/E_j)$$

$$E_1 = 8.84 \text{ MPa} ; E_2 = 9.63 \text{ MPa} ; E_{3,5} = 17.1 \text{ MPa} ; E_{6,8} = 29.8 \text{ MPa}$$

$$E_{9,16} = 24.7 \text{ MPa} ;$$

$$E_c = E_1 = 8.84 \text{ MPa}$$

$$E_d = 4.0 / (1/E_1 + 1/(0.85 E_2) + 1/E_{3,5} + 1/(2.5 E_{6,8}) + 1/(2.5 E_{9,16})) = 12.4 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c = 1.1$$

$$\lambda_c = 1.12$$

$$\alpha_c = 0.67 \text{ (même formule que pour } E_c)$$

$$\alpha_d = 0.674 \text{ (même formule que pour } E_d)$$

$$S_c = \alpha_c / (9 E_c) * (q_{\text{ref}} - \sigma'_{v0}) * \lambda_c * B = 0.132 \text{ cm}$$

$$S_d = 2 / (9 E_d) * (q_{\text{ref}} - \sigma'_{v0}) * 0.6 * (\lambda_d * B / 0.6)^{\alpha_d} = 0.235 \text{ cm}$$

$$S_f = S_c + S_d = 0.367 \text{ cm}$$

