

REPUBLIQUE DU BENIN

MINISTERE DES FINANCES ET DE L'ECONOMIE
ORDONNATEUR NATIONAL DU FED

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'HABITAT ET DE L'URBANISME (MEHU)
DIRECTION DE L'URBANISME ET DE L'ASSAINISSEMENT (DUA)

ETUDES DE CONCEPTION ET D'EXECUTION DE L'ASSAINISSEMENT
DES BASSINS AA ET XX
ET
ELABORATION DES DOSSIERS D'APPEL D'OFFRES
POUR L'EXECUTION DES TRAVAUX

DEUXIEME RAPPORT TECHNIQUE

Volume 3 : Etude géotechnique



FINANCEMENT : FONDS EUROPEEN DE DEVELOPPEMENT

FEVRIER 2005



Table des matières

Avant propos	5
1. Méthodologie utilisée	6
1.1 Déroulement des activités géotechniques	8
1.2 Equipements pour les activités	9
1.2.1. La Sondeuse	
1.2.2. Le Pénétrromètre dynamique	
1.2.3. Le Préssiomètre	
1.2.4. Le Scissomètre	
1.2.5. Le Laboratoire	
1.3 Formules d'application	13
2. Activités géotechniques menées sur les sites	22
2.1 Bassin XX-Agla	24
2.1.1. Site de construction du pont à Godomey-Menontin	
2.1.2. Site d'élargissement du dalot sous la route inter-états	
2.1.3. Canal X3 à côté de la route inter-états	
2.2 Bassin AA-Fidjrossé	27
2.2.1. Site d'élargissement du dalot sous le chemin du fer (Fidjrossé nord)	
2.2.2. Site de construction de dalots sous le chemin du fer (Fidjrossé sud)	
2.2.3. Digue et station de pompage de Akogbato	
2.2.4. Site d'implantation du canal A2	
3. Résultat final de la recherche des emprunts	30
4. Conclusions	33
Bibliographie	

Annexes :

Annexe 1 : Monographies des sites et résultats:

Bassin	N°	Description
XX - Agla	1	<i>Site GM,3SC,3PD,1EP</i>
	2	<i>Site RI,1SC,1PD,1EP</i>
	3	<i>Site X3,3PD</i>
AA - Fidjrossè	4	<i>Site FI-3,2PD</i>
	5	<i>Site FI-4,1SC,3PD</i>
	6	<i>Site AKO,2SC,2PD,1ES</i>
	7	<i>Site A2,1SC,4PD</i>

Annexe 2 : Documentation photographique

Liste des abréviations :

CNERTP	Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics
DCE	Délégation de la Commission Européenne
MEHU	Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme
DUA	Direction de l'Urbanisme et de l'Assainissement du MEHU
IGIP	Ingénieur Gesellschaft für Internationale Planungsaufgaben mbH. Darmstadt RFA

Unités de mesure et conversions

Forces :

N = newton

kN = kilonewton

MN = meganewton

kg = kilo force

t = tonne force

g = gramme force

Pressions :

MPa, MN/m², kPa, kN/m², bar, kg/cm², t/m²

1bar = ~1 kg/cm² = 0,1 MPa = 0,1 MN/m² = 100 kN/m²

1kg/cm² = 10 t/m² = 0,098 MPa = 98,067 kPa = 0,98067 bar

1MPa = 1 MN/m² = 1000 kN/m² = 1000 kPa = 10 bar = 10,197 kg/cm² = 101,97 t/m²

Poids de volume :

g/cm³ t/m³ kN/m³

1kN/m³ = 0,10197 t/m³

1 t/m³ = 9,8067 kN/m³

Tableaux dans le texte :

N°	Description
1	Calendrier des activités géotechniques
2	N_{spt} /Angle de frottement (Peck-Hanson-Thorburn ; 1953-1974)
3	N_{spt} / Cohésion (c_u kg/cm ²) (Terzaghi-Peck ; 1948-1967)
4	N_{spt} / Cohésion - argiles (c_u kg/cm ²) (Terzaghi-Peck ; 1948-1967)
5	N_{spt} /Densité relative (D_r %)
6	N_{spt} /Densité relative (D_r %)
7	Classification du sol
8	Echantillonnage au site n°1 de Godomey-Menontin
9	Tassements admissibles
10	Echantillonnage au site n°2 de la route inter.états
11	Echantillonnage au site n°5 de Akogbato
12	Identification des carrières
13	Analyses des sables
14	Volumes d'exploitation
15	Cadre de synthèse des activités exécutées

Figures:

N°	Description
1	Abaque pour le calcul de K
2	Facteur de portance
3	Résistance au frottement latéral du pieu
4	Chorographie des sites des prospections géotechniques

Avant propos

La présente étude fait partie du *deuxième rapport technique* relatif au *projet d'assainissement des bassins AA et XX de Cotonou*. Elle donne le complément des premières investigations géotechniques effectuées pendant les phases initiales du projet et synthétisées dans le *premier rapport technique* de juillet 2004.

La finalité de ces recherches est l'identification des typologies de fondation les plus appropriées pour l'implantation des ouvrages prévus (ponts, dalots, canaux, stations de pompage).

A cet effet une mission additionnelle de l'expert géotechnicien fut initiée le premier novembre 2004 avec la finalité de programmer et suivre sur le terrain les sondages et essais nécessaires. Cette mission eut une durée de trois mois.

Le CNERTP (Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics) fut chargé de la réalisation pratique des essais en raison de son expérience directe et de son équipement.

Pendant les deux premières semaines l'expert a effectué avec les techniciens du CNERTP toutes les visites des lieux d'intérêt des bassins d'Agla et Fidjrossé pour identifier les positions et les conditions techniques et logistiques pour l'exécution des essais.

Les terrains dans lesquels le projet doit être réalisé se trouvent dans l'environnement de la barre côtière, essentiellement sablonneux et plat, et caractérisés par des cotes dont le maximum atteint 8,00 m au dessus du niveau de la mer. Dans cet endroit il existe de nombreuses zones basses, marécageuses, constituant des bas fonds et des cuvettes qui sont sujets à des inondations annuelles et prolongées.

1. Méthodologie utilisée

La planification des activités de terrain et de laboratoire a été basée sur les résultats des investigations géologiques déjà effectuées pendant la première phase d'activité (décembre 2003 – mars 2004), investigations qui ont fourni les caractéristiques générales du sous sol, et notamment la qualité lithologique des terrains et la disposition tempo-spatiale des diverses couches.

Au regard de l'implantation des ouvrages, les lithologies les plus mauvaises qu'on peut rencontrer dans les zones analysées sont :

- **Les argiles molles**
- **Les vases**
- **Les tourbes**

De façon générale, les **argiles molles** rencontrées en Afrique présentent des plasticités moyennes à forte I_p , de l'ordre de 25 à 80, une forte teneur en matières organiques et une stratification marquée. Elles sont normalement consolidées et, donc, très compressibles, si bien qu'elles posent des problèmes très sérieux lors des travaux de remblai ou de construction des ouvrages.

Les **vases** sont constituées de particules inférieures à 2 microns. La proportion d'eau retenue est assez forte. Elles contiennent une certaine proportion de matières organiques. Elles peuvent être tourbeuses si la présence de certains micro-organismes favorise la formation de tourbe.

En se consolidant, la vase perd une partie de son eau, la structure se détruit et elle se transforme en une argile, ou une marne, d'autant moins molle que la consolidation est plus importante.

On confond souvent vases et argiles molles. Ces sols se caractérisent par une forte teneur en eau et un faible poids spécifique (souvent $< 10 \text{ kN/m}^3$), une teneur en matière organique de 2 à 10%, une faible cohésion non drainée avec c_u de l'ordre de 15 kPa, une forte compressibilité donnant lieu à des tassements secondaires importants, une faible perméabilité, une sur-consolidation en surface et sous-consolidation dans les couches profondes.

Les **tourbes** ont une teneur en eau très forte, de 100 à 600%, et un poids spécifique sec très faible. La teneur en matières organique est généralement supérieure à 10% et peut atteindre 80%. La cohésion non drainée peut varier selon la tourbe de 10 à 25 kPa.

En outre, on rencontre dans la zone les **sables** lâches et les **limons** qui se caractérisent aussi par une faible portance et une forte compressibilité.

Des précautions doivent être prises pendant la construction afin que l'édification trop rapide n'entraîne d'importants tassements.

En générale, dans les deux bassins on peut observer une substantielle différence qualitative des relatives caractéristiques physico-chimiques du sous sol.

Notamment, le sous sol du bassin XX d'Agla montre une phase très avancée de l'urbanisation qui se manifeste par la présence d'épaisseurs intéressantes de remblai sablonneux, souvent mélangé à des ordures.

D'autre part, en dessous de ce remblai, il y a un niveau de tourbes/argiles molles de mauvaise caractéristiques qui a déjà provoqué le phénomène de tilting/basculage de nombreux bâtiments et ouvrages le long de la route inter-états.

Diversement, le sous sol du bassin de Fidjrossè montre essentiellement des dépôts sablonneux récents jusqu'à la profondeur d'intérêt géotechnique exploité ; c'est à dire au contact avec les argiles grises de bonne compacité.

Dans tout les cas, à la base de tous les dépôts, il y a de l'argile de bonne, ou très bonne, compacité.

La caractéristique géognostique la plus évidente dans tous les deux bassins est la présence constante de l'eau qui se trouve presque au niveau du terrain avec des excursions saisonnières de profondeur considérables (amplitude de 0,50 à 1,50 m) au cours de l'année hydrologique. Un changement saisonnier des caractéristiques physico-chimiques de l'eau a été également observé.

1.1 Déroulement des activités géotechniques

L'exécution des activités de terrain a démarré le lundi 16 Novembre pour être achevée au début de l'année 2005. Au même moment, le consultant a suivi le déroulement des tests sur les échantillons de terrain dans le laboratoire du CNERTP.

Au cours du mois de janvier 2005, l'expert a reçu le premier rapport du CNERTP qui a permis de préciser toutes les caractéristiques lithologiques et physico mécaniques du sous sol d'intérêt pour le choix des ouvrages de fondation et les calculs géotechniques au niveau d'interaction structure-terrains.

Activités /	Novembre				Décembre				Janvier				
	1	15	16	30	1	15	16	31	1	15	16	21	
Programme des activités													
Suivi des activités de terrain													
Suivi des activités de laboratoire													
Suivi élaboration des données et rapport CNERTP													
Elaboration des données et rapport de l'expert													

1.2 Equipement

Les équipements suivants, propriétés du CNERTP, ont été utilisés pour la mise en œuvre de tous les sondages du terrain et tests de laboratoire.

1.2.1. La Sondeuse

La sondeuse a été utilisée pour exécuter des sondages carottés profonds pour une profondeur variable entre 15 et 35 m, ce qui a permis d'expliquer la stratigraphie du sous sol, d'effectuer l'échantillonnage des terrains d'intérêt à envoyer au laboratoire et de mesurer la profondeur de l'eau dans les trous.

Les caractéristiques et spécifications de la sondeuse utilisée sont:

- Machine de forage APAFOR 38 RP équipé d'un moteur diesel à refroidissement air/huile de marque DEUTZ. Ce moteur à 3 cylindres, équipé d'une capote d'insonorisation pour un confort d'utilisation optimum, délivre 42 CV à 2600 tr/min ou 45 CV à 2800 tr/min, ce qui correspond à l'utilisation maximum.



Photo 1 : La sondeuse utilisée par le CNERTP

1.2.2. Le Pénétromètre dynamique

Le pénétromètre utilisé est du type dynamique et a les caractéristiques suivantes :

- **M** = Masse du mouton **= 65 kg**
- **H** = Hauteur de chute du mouton **= 50 cm**
- **A** = Section de la pointe conique **= 15,2 cm²**
- **P** = Masse des tiges et de l'enclume (variable selon la profondeur d'investigation)
- **L** = Longueur de chaque tige **= 3,00 m**

Le symbole **E** indique l'enfoncement unitaire des tiges (par coup de mouton) en cm.

La pénétration de la pointe en sous sol se produit grâce à la percussion du poids sur la tige : tous les 20 cm de pénétration, le nombre **N** coups/20cm de coups qui ont été nécessaires pour l'enfoncement est enregistré.

L'histogramme relatif, et sa forme, donne à l'expert la possibilité d'interpréter la nature du terrain étudié et de partager le profil entier en plusieurs couches homogènes.

En utilisant un logiciel à l'ordinateur on a déterminé des paramètres types (résistance dynamique à rupture et contrainte) qui sont enregistrés dans les fiches monographiques pour chaque essai et pour les deux bassins de projet.



Photo 2 : Le pénétromètre dynamique

1.2.3. Le Pressiomètre

Le pressiomètre Louis Ménard a été conçu pour évaluer directement les caractéristiques mécaniques des sols par mesure directe sur place.

L'essai pressiométrique est un essai de chargement du terrain in situ. Il consiste à gonfler à l'intérieur d'un forage une sonde cylindrique, dilatable radialement. On réalise ainsi un chargement rapide du sol sous contraintes radiales uniformes.

L'instrument se compose de :

- **Un contrôleur de pression et volume placé en surface.**
- **Une sonde préssiométrique placée dans le forage**
- **Des circuits tubulaires d'alimentation en eau et gaz.**

On met en place la sonde préssiométrique dans un forage réalisé préalablement soit par enfoncement soit par battage direct dans certains terrains. Les cellules sont mises en pression par injection d'eau et on effectue les mesures jusqu'à rupture du terrain, selon un mode opératoire très précis.

Il s'agit d'un essai rapide permettant de définir un graphique qui montre trois phases :

- **Phase de compactage**
- **Phase pseudo élastique**
- **Phase plastique**

L'essai ne peut être interprété qu'en contraintes totales, et il ne permet pas d'obtenir des pressions interstitielles.



Photo 3: Le pressiomètre Louis Menard

1.2.4. Le Scissomètre

L'essai consiste à entraîner en rotation un croisillon à quatre pales (moulinet) préalablement enfoncé dans le sol à la profondeur désirée, jusqu'à la rupture de l'argile le long de la surface cylindrique engendrée par la rotation du moulinet.

Le mouvement de rotation est appliqué par l'intermédiaire d'un train de tiges. La vitesse de rotation imposée en surface est constante, mais compte tenu de l'élasticité du système de mesure du moment appliqué, et du train de tiges, elle peut être variable au niveau du moulinet.

L'appareil peut être mis en œuvre par vérinage à partir de la surface ou au fond d'un forage tubé.



Photo 4 : Les moulinets cruciformes du scissomètre

1.2.5. Le Laboratoire

Tous les échantillons intacts et remaniés extraits au cours des sondages ont été envoyés au laboratoire du CNERTP pour les analyses de caractérisation physico-chimiques, à savoir :

- γ_s = Poids des grains solides
- γ = Poids du sol
- γ_d = Poids du sol sec
- W = Teneur en eau naturelle
- W_L = Limite de liquidité
- I_p = Indice de plasticité
- ES = Equivalent de sable
- Gr = Granulométrie
- Essai triaxial UU
- Essai de cisaillement direct
- Essai œdométrique

1.3 Formules d'application

Ci après on explique la manière d'utiliser les diverses données à partir des investigations géotechniques in situ sur les zones d'implantation des ouvrages pour les bassins XX-Agla et AA-Fidjrossè de Cotonou.

Données du pénétromètre dynamique

La résistance dynamique à la rupture du sol, à la pointe de l'appareil, a été estimée selon la formule dite « des Hollandais » :

$$R_{pd} = N^2 \times H / [A \times e (M + P)]$$

R_{pd} = Résistance dynamique à la pointe

N = Nombre de coups pour un enfoncement de 20 cm (u')

H = Hauteur de chute

A = Section de la pointe conique

e = Enfoncement unitaire (u') pour chaque coup (u'/N)

M = Masse du mouton

P = Poids total du système, tiges comprises

A partir de cette valeur R_{pd} on a la possibilité de rechercher la valeur de N_{spt} pour se référer à la littérature internationale qui prend en compte l'essai Standard Pénétration Test pour la caractérisation des terrains exploités.

A cet effet, on peut calculer le N_{spt} correspondant en multipliant N par le coefficient théorique d'énergie β de l'essai au pénétromètre dynamique :

$$N_{spt} = \beta N$$

Pour l'estimation du coefficient β on peut prendre, moyennement, une valeur de **0,70- 0,80**.

Cette correspondance a donné au consultant la possibilité d'évaluer la valeur de N_{spt} et de connaître les paramètres caractéristiques (angle de frottement, cohésion non drainé, densité relative) de chaque couche de terrain exploité dans les sous sol d'intérêt du projet (voir tableaux des sites).

Lorsque les sols sont saturés, comme dans tous les cas rencontrés, il faut tenir compte de l'effet de la saturation, et particulièrement dans les sols sablonneux très fin et limoneux compacts.

Dans ces derniers cas, on a introduit une correction suivant la formule proposée par certains auteurs (Terzaghi & Peck -1948) :

$$N'_{spt} = 15 + 0,5 (N_{spt} - 15)$$

Valable pour $N_{spt} > 15$ coups/30 cm

En tous cas, la profondeur max d'enfoncement qui donne des *résultats utilisables* ne peut pas dépasser les 25 m de profondeur.

Ci après on reproduit les tableaux de correspondance prévoyant d'utiliser les valeurs de N_{spt} déjà corrigés pour la constante présence de l'eau :

Tableau n°2 : N_{spt} /Angle de frottement (Peck-Hanson-Thorburn ; 1953-1974)

N_{spt}	φ'	N_{spt}	φ'
5	28	30	36
10	30	35	37,3
15	31,5	40	38,5
20	33	45	39,8
25	34	50	41

Note. Dans les cas de terrains granulaires

Tableau n°3 : N_{spt} / Cohésion (C_u kg/cm²) (Terzaghi-Peck ; 1948-1967)

N_{spt}	C_u	N_{spt}	C_u	N_{spt}	C_u
2	0,13	12	0,75	22	1,32
4	0,25	14	0,88	24	1,50
6	0,38	16	1,00	26	1,63
8	0,50	18	1,12	28	1,75
10	0,63	20	1,25	30	1,88

Note. A utiliser pour les terrains cohésifs, mais en tout cas, très peu fiable

Tableau n°4 : N_{spt} / Cohésion (C_u kg/cm²). (Terzaghi-Peck ; 1948-1967)

N_{spt}	Argile	C_u kg/cm ²
0-2	<i>très molle</i>	0-0,125
2-4	<i>molle</i>	0,125-0,25
4-8	<i>modérément consistant</i>	0,25-0,50
8-15	<i>consistant</i>	0,50-1,00
15-30	<i>très consistant</i>	1,00-2,00
> 30	<i>extrêmement consistant</i>	2,00

Note. Dans les cas de terrains cohésifs

Tableau n° 5 : N_{spt} /Densité relative (D_r %)

N_{spt}	D_r %	N_{spt}	D_r %
5	18	30	65
10	35	35	70
15	43	40	75
20	50	45	80
25	58	50	85

Note. Dans les cas de terrains granulaires

Tableau n°6 : N_{spt}/Densité relative (D_r %)

N _{spt}	Sable	D _r %
0-4	<i>très lâche</i>	0-0,125
4-10	<i>lâche</i>	0,125-0,25
10-30	<i>moyennement lâche</i>	0,25-0,50
30-50	<i>compact</i>	0,50-1,00
>50	<i>très lâche</i>	1,00-2,00

Note. Dans les cas de terrains granulaires

La formule utilisée par la méthode des Hollandais, utilisant les données de l'essai au pénétromètre, est la suivante:

$$\text{Contrainte admissible} = R_{pd} / 20$$

Cette formule est valable pour une **fondation superficielle** et pour des tassements admissibles limités à 2,5 cm.

Données du pressiomètre

Il existe une relation empirique entre la pression limite p_l et la cohésion drainée c_u :

$$C_u = p_l - p_o / 5,5$$

Calcul de la force portante des fondations superficielles

Le calcul des fondations superficielles résulte directement de l'interprétation de l'essai pressiométrique.

La contrainte portante limite est donné par l'expression :

$$q_l = q_o + k (p_{le} - p_o)$$

Et la contrainte admissible est:

$$q_a = q_o + (k / 3) \times (p_{le} - p_o)$$

Les différents paramètres ont respectivement les significations suivantes:

q_o = contrainte verticale totale au niveau de la fondation après achèvement des travaux

p_o = contrainte horizontale totale au niveau de la fondation après achèvement des travaux

k = facteur appelé facteur de portance; fonction de la nature du sol qui l'on classe suivant les catégories suivantes:

Tableau n°7 : Classification du sol

<i>Plages des pressions limites P_1 (bar)</i>	<i>Nature du sol</i>	<i>Catégories du sol</i>
0-12 0-7	Argile Limon	I
18-10 12-30 4-8 10-30	Argile raide et marne Limons compacts Sable compressible Roche tendre et altérée	II
10-20 40-100	Sable et gravier Roche	III
30-60	Sable et gravier très compact	III bis

L'abaque pour le calcul du facteur de portance k est donné à la page suivante.

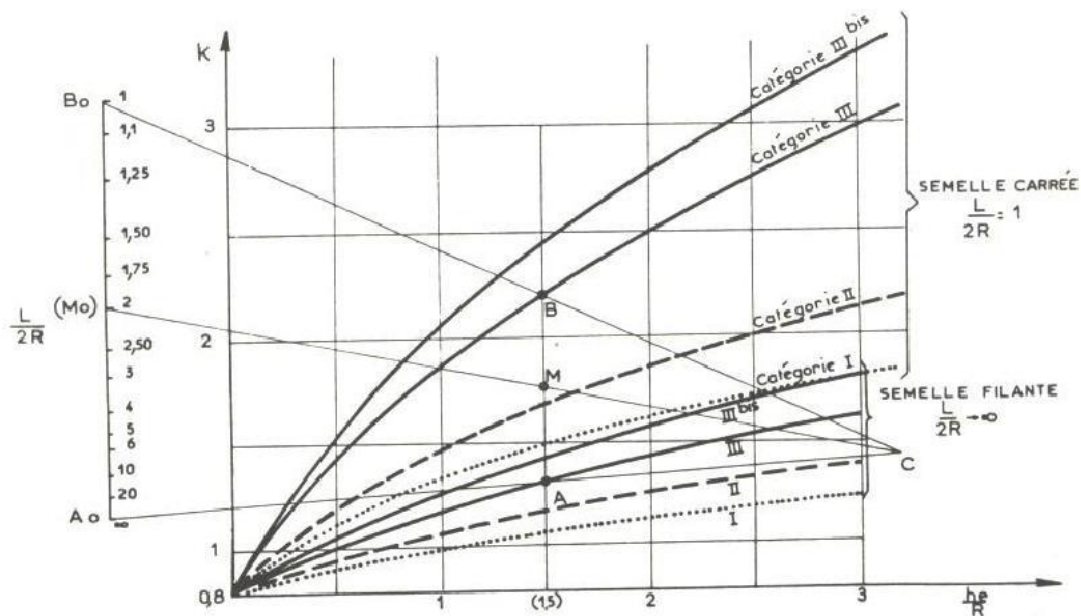
Fig n°1 : Abaque pour le calcul de k 

Fig. IV.5. — L'échelle graduée $L/2R$ permet de calculer graphiquement le facteur de portance d'une semelle rectangulaire par interpolation entre semelle filante et semelle carrée.

Exemple : calculer la valeur de k pour $h_e/R = 1,5$, $L/2R = 2$ (rapport courant pour une semelle isolée) et un sol de catégorie III. On trace la droite $h_e/R = 1,5$ qui coupe les deux courbes de catégorie III en A et B. Il s'agit de calculer l'ordonnée k de M de telle sorte que M divise le segment AB dans le même rapport que M_0 le segment A_0B_0 . On trace donc A_0A et B_0B qui se coupent en C par où on mène une droite passant par M_0 .

Calcul de la force portante des fondations profondes

a. Résistance en pointe

La résistance limite q_p sous la base du pieu est exprimée par la relation :

$$q_p = q_o + k (p_{le} - p_o)$$

Dans cette formule:

q_o = pression verticale au niveau de la pointe du pieu (l'ouvrage étant terminé)

p_o = pression horizontale au niveau de la pointe du pieu à la date de l'essai

p_{le} = pression équivalente = $(p_{l1} \times p_{l2} \times p_{l3})^{1/3}$

p_{l1} = pression à la distance B au-dessus du niveau de la pointe

p_{l2} = pression au niveau de la pointe

p_{l3} = pression à la distance B au-dessous du niveau de la pointe (B sera prise égal à 1m pour les pieux de diamètre inférieur à 1m).

k = facteur de portance (voir figure suivante)

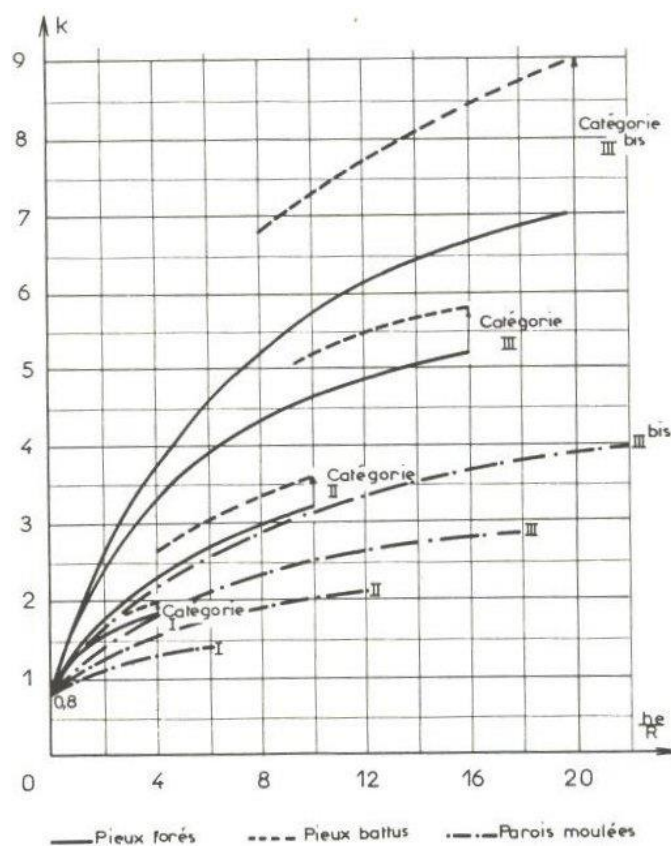


Fig n°2

Facteur de portance.

Le facteur de portance **k** est fonction de :

- La nature du pieu
- La nature du sol au niveau de la pointe du pieu
- L'encastrement du pieu dans le sol de fondation

La contrainte admissible sous la pointe est :

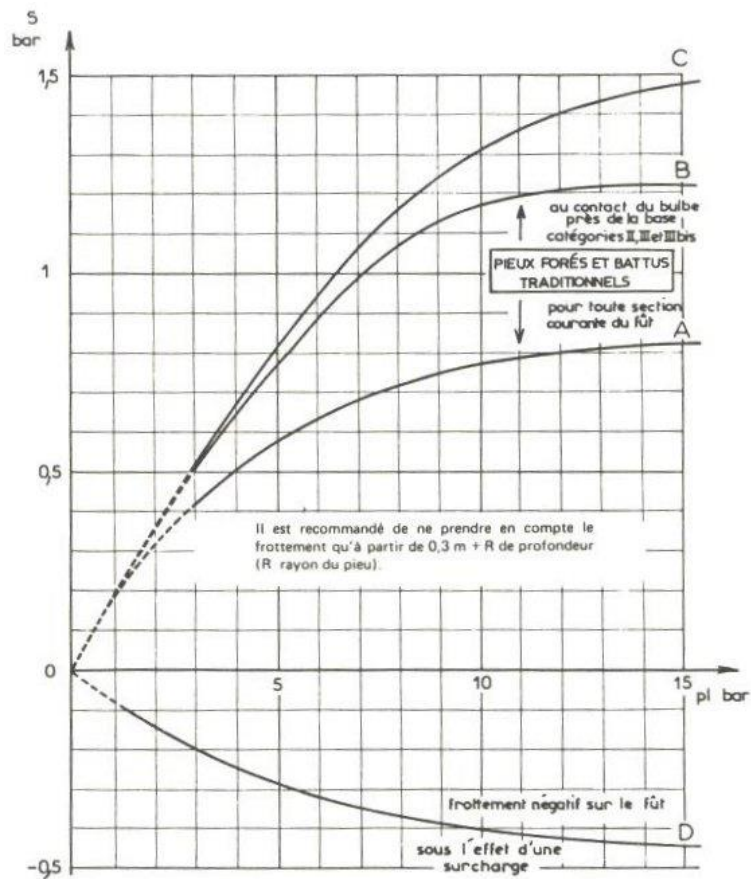
$$q_p = q_o + k / 3 (p_{le} - p_o)$$

La force portante sous la pointe étant de :

$$Q_p = S q_p \text{ (S section de la pointe).}$$

b. Frottement latéral

Grâce à l'abaque reproduit ci-après on peut obtenir la valeur du frottement latéral unitaire limite à partir de la valeur de la pression limite p_l selon que le pieu soit foré ou battu.



Résistance au frottement latéral d'un pieu en fonction de la pression limite.

Fig n°3: Résistance au frottement latéral d'un pieu en fonction de la pression limite

En multipliant celle-ci par la surface latéral intéressée tout ou long de la hauteur du pieu, et en sommant sur toute la hauteur du pieu on obtient Q_f , la force de frottement latéral limite.

c. Portance du pieu

$$Q = Q_p + Q_f$$

Données de l'essai au scissomètre

L'interprétation a été faite en supposant que la surface de rupture était parfaitement circulaire et que la résistance c_u était mobilisée en tous les points de cette surface en même temps. Le moment appliqué au moulinet est alors maximum et peut s'écrire :

$$M_m = K c_u$$

M_m étant le moment de torsion et K un coefficient dépendant de la géométrie du moulinet.

Données de l'essai à l'œdomètre

On a utilisé cet essai pour pouvoir effectuer le calcul des tassements dans les sols compressibles du type des vases, tourbes et argiles.

En utilisant la théorie de l'élasticité, et après avoir prélevé l'échantillon intact d'intérêt, on détermine la courbe œdométrique en faisant varier σ' (voir essai au laboratoire CNERTP en annexe).

Le tassement ΔH de la couche de hauteur H est alors, compte tenu de l'expression de Δe pour l'échantillon testé de hauteur $1 + e_o$;

$$\Delta H = H \Delta e / 1 + e_o = H (1 / 1 + e_o) C_c \{ \log (\sigma'_{o'} + \Delta \sigma' / \sigma'_{o'}) \}$$

Etant C_c le coefficient de compression obtenu au laboratoire.

2. Activités géotechniques menées sur les sites

La **figure 4** indique les sites où les sondages et essais ont été effectués, ils correspondent aux localisations des ouvrages à réaliser.

Toutes les activités menées ont été dénommées selon la méthodologie suivante :

a) identification du site

Un numéro, ou un sigle, correspondant à la numérotation utilisée sur la chorographie, suivi d'un sigle indiquant la localité :

1GM = route Godomey-Menontin (construction du pont L= 30 m)

2RI = Route inter-états (élargissement des ouvrages existants)

X3 = Bas-fond du bassin XX-Agla le long de la route inter-Etat (futur canal X3)

3RF= Route Fidjrossè nord (élargissement des ouvrages existants)

4RF= Route Fidjrossè sud (construction de dalots)

5AKO = Akogbato (construction de digue et station de pompage)

A2 = Bas-fond du bassin AA-Fidjrossè (futur canal A2)

b) typologie de l'essai

Un sigle indiquant le type d'activité menée et la numérotation relative, comme dans l'exemple suivant :

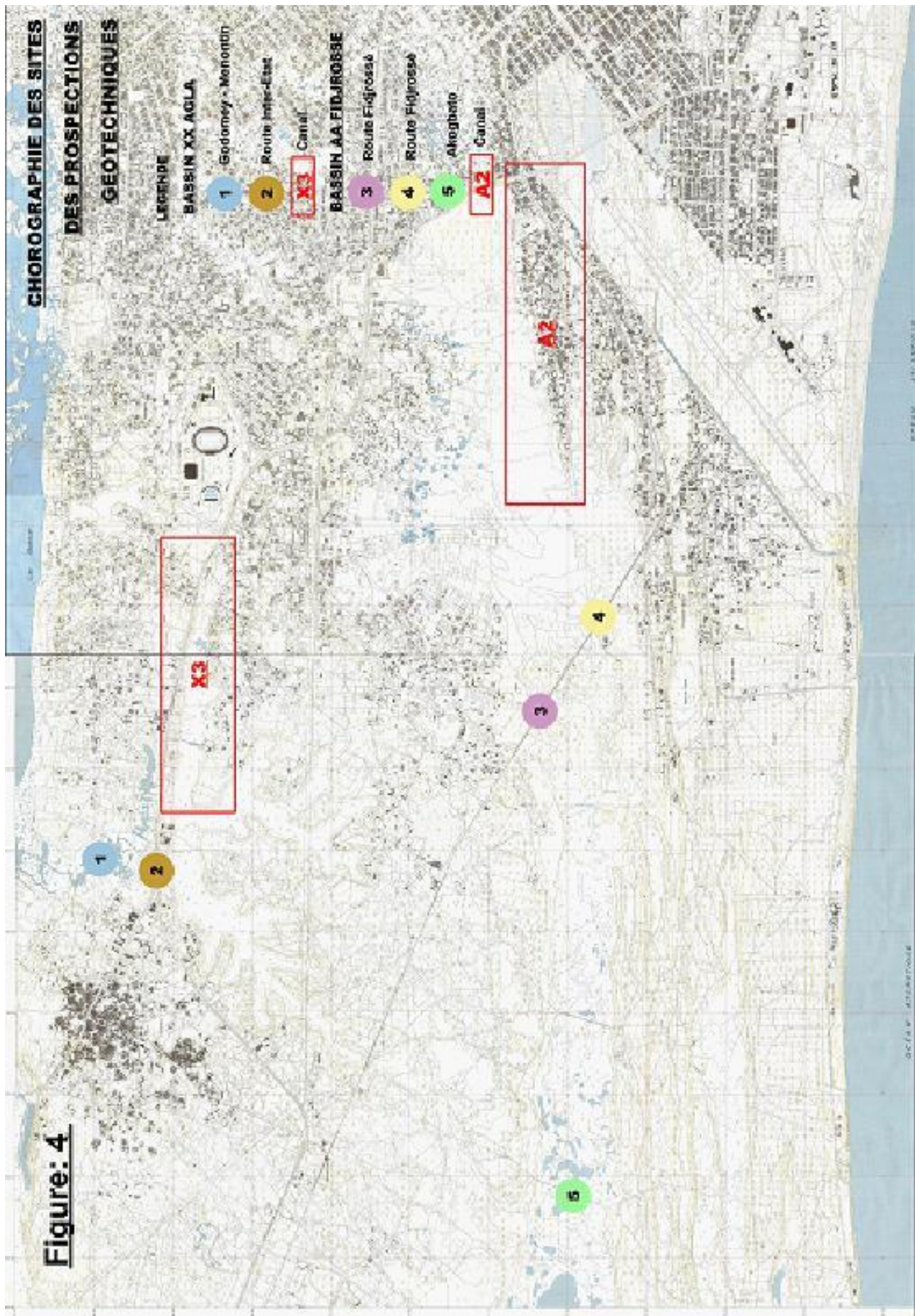
SC (1,2,3)= Sondage carotté

PD (1,2,3,4) = Pénétromètre dynamique

EP (1)= Essai au préssiomètre

ES (1)= Essai au scissomètre

Les monographies et le détail des résultats obtenus pour chaque site sont donnés à l'**annexe 1**.



2.1 Bassin XX-AGLA

2.1.1. Site de construction du pont à Godomey-Menontin

La zone de construction se situe sur la route de contournement nord qui relie les quartiers de Godomey et Menontin, au niveau du franchissement du chenal avec les trois buses ARMCO existantes.

Les 3 sondages carottés et les essais au pénétromètre ont été positionnés le long de la route à une distance moyenne de 85 m ; la profondeur moyenne de forage est de 30 m.

Les profils lithologiques relevés montrent trois successions diverses dont la plus mauvaise est celle du sondage GM/SC3. Dans ce profil on peut remarquer une couche de tourbe argileuse d'épaisseur d'environ 10 m, jusqu'à la profondeur de 13 m du niveau terrain.

A cette couche succèdent du limon et du sable jusqu'à une profondeur de 23 m et après de l'argile grise de très bonne compacité. Cette même argile grise se retrouve à la base de tous les sondages faits dans les sous sols des deux bassins.

La typologie de la fondation prévue pour le pont est sur pieux : la portance totale en service est à calculer en utilisant le profil au pressiomètre en prenant soin d'évaluer les données à la base du pieu, à 1 m au dessus et en dessous de la pointe du pieu.

Dans le cas où on choisit d'utiliser des pieux métalliques, à cause de la présence de l'eau et de sa qualité corrosive, ou des pieux à chemisage métallique perdu, il est raisonnable de réduire les valeurs du frottement données par l'abaque en **figure 3**. La réduction à appliquer dans le cas des sables et graviers immergés est de 30% environ et de 20% dans les terrains argileux.

Il est conseillé également de réduire l'effet du frottement lorsque le pieu devient important. Les coefficients de réduction sont les suivantes :

- ❖ **0.90 pour un pieu de 80 cm de diamètre**
- ❖ **0,70 pour un pieu de 120 de diamètre.**

La force portante totale admissible due au frottement latéral est obtenue en appliquant à la force de frottement précédemment calculée un coefficient de sécurité 2 :

$$Q_f = Q_f / 2$$

Les résultats des essais au laboratoire pour le site considéré sont donnés ci-dessous.

Tableau 8 : Echantillonnage au site n°1 - Godomey-Menontin

Sigle du sondage	Echantillon			ES	W _I	I _p	Y _s	Y	Y _d	W	MO	Triaxial UU	Cisaillement direct	Oedométrique
	Intact	Profondeur m	Remanié											
GM/SC1	x	6,5	x		48,5	21,5	23,1	13,4	6,5	107,7			C _u 0,20 φ 6	C _c 1,0
GM/SC2														
GM/SC3		4	x		40,9	17,24	24,3	19,30	14	35,2				
		7	x		45,8	19,47	20,30	12,40	5,0	152,9				
		10	x		43,40	17,70	24,40	12,60	5,0	149,4				
	x	15	x		41,5	17,67	22,23	15,00	8,7	70,50		C _u 0,15 φ 12		
	x	27	x		52,60	24,05	24,08	17,00	12	41,02			C _u 0,25 φ 5	

2.1.2. Site d'élargissement du dalot sous la route inter-états

Le sondage carotté a montré une couche de tourbe argileuse ou vase jusqu'à la profondeur d'environ 10 m ; la présence de cette couche est indiquée aussi par le profil préssiométrique et l'essai au pénétromètre correspondant.

Cette épaisseur d'accumulation est confirmée par la présence de la même tourbe au pont de Godomey-Menontin et aussi par les essais au pénétromètre effectués tout le long du canal X3 en projet.

Le calcul des fondations superficielles des dalots résulte directement de l'interprétation de l'essai pressiométrique, mais les tassements différentiels entre appuis peuvent avoir des conséquences dangereuses sur la stabilité des ouvrages. Afin d'évaluer ces effets, on peut considérer les tassements calculés avec les données de l'essai œdométrique de la tourbe (essai sur l'échantillon du sondage GM/SC1).

L'amplitude des tassements différentiels dépend de la nature de la construction, et l'expérience montre qu'une structure peut supporter des tassements différentiels de l'ordre de 1/300 de la distance entre appuis. Pour des bâtiments du type courant, il apparaît des fissures lorsque le tassement différentiel dépasse 5 cm.

Il faut être prudent quant aux incertitudes dues au calcul des tassements, néanmoins on peut énoncer les règles suivantes qu'il faut respecter pour l'élaboration du projet.

Tableau 9 : Tassements admissibles

Tassement différentiel admissible pour l'ouvrage	1/500 de la portée entre appuis, et 1/1000 si l'on veut obtenir le maximum de sécurité
Tassement différentiel admissible	Sur argile ; 3 à 4 cm Sur sable ; 2 à 3 cm
Tassement total	Avec semelle isolée : Argile 6 cm Sable 4 cm Avec un radier : Argile 10 cm Sable 6 cm

Même dans le cas d'un dalot de longueur considérable on peut utiliser des pieux métalliques malgré la présence de l'eau.

Ci-dessous sont donnés les résultats des essais au laboratoire.

Tableau 10 : Echantillonnage au site n°2 - route inter- états

Sigle du sondage	Echantillon			Activités au laboratoire et résultats											
	Intact	Profondeur	Remanié	G _r	ES	w _l	I _p	Y _s	Y	Y _d	W	MO	Triaxial UU	Cisaillement	Oedométrique
RI/SC1	x	8	x	x	36			20,3	18,0	12,8	41,08				
		12	x	x				26,2	21,1	17,5	20,56				

2.1.3. Canal X3 à coté de la route inter-états

Pour l'étude des caractéristiques géotechniques de cet endroit on a utilisé les essais au pénétromètre dynamique déjà exécutés par le CNERTP au cours de l'année 1999 sur demande de la DCE de Cotonou.

L'examen des profils montre des épaisseurs importantes d'argile molle / tourbe qui se réduisent progressivement de l'ouest vers l'est, à partir d'une profondeur de 10 m (voir RI/PD1) au site du dalot de la route inter-états, jusqu'à quelques mètres à l'extrémité est du bas-fond.

2.2 Bassin AA-Fidjrossé

2.2.1 Site d'élargissement des dalots sous le chemin de fer (Fidjrossé nord)

Le site est indiqué dans la chorographie avec le numéro 3 pour le distinguer du site n°4 qui se trouve plus au sud.

Les profils au pénétromètre dynamique montrent des épaisseurs importantes, à la profondeur d'environ 10 m, de sable tourbeux.

2.2.2. Site de construction de dalots sous le chemin de fer (Fidjrossé sud)

Le site est indiqué dans la chorographie avec le numéro 4.

Ces profils présentent des caractéristiques meilleures par rapport au site du dalot n°4. La présence du sable tourbeux est évidente jusqu'à la profondeur d'environ 6 m. Dans les deux cas on peut prévoir pour la construction des dalots la fondation superficielle.

2.2.3. Digue et station de pompage de Akogbato

Le milieu géologique du site étudié est cohérent avec la géologie de la barre côtière : il s'agit d'un milieu pour la plupart sablonneux.

Sur le site d'implantation du bassin d'aspiration prévu, en raison de la présence d'eau et de terrains meubles, des plates-formes de dimensions 4x4 m ont été construites pour pouvoir installer l'équipement de sondage (voir documentation photographique en annexe).

Les profils au pénétromètre montrent de bonnes qualités géotechniques des sables qu'on retrouve à 2-3 m de profondeur à partir de la cote actuelle du bas fond.

En ce qui concerne la construction de la station de pompage, il faudra considérer la nécessité d'utiliser des pompes submersibles de grande capacité qui devront être logées dans un bassin d'aspiration profond. Dans ce cas-là il faudra éviter la construction d'un bassin complètement étanche parce que ça pourrait engendrer des poussées hydrostatiques externes liées aux fortes sous pressions de la nappe. Le niveau d'eau dans le bassin sera variable le long de l'année en fonction des volumes d'eau entrants et du fonctionnement des pompes, mais il sera nécessaire de dimensionner le système de façon à avoir toujours un volume d'eau considérable à l'intérieur de l'ouvrage. En tout cas la fondation de la station de pompage devra être réalisée sur pieux avec chemise en acier.

Tableau 11. Echantillonnage au site n°5 (Akogbato)

Sigle du sondage	Echantillon			ES	w _l	I _p	Y _s	Y	Y _d	W	MO	Triaxial UU	Cisaillement	Oedométrique
	Intact	Profondeur	Remanié											
AKO/SC1	x	19	x		33,1	9,1	25,0							
AKO/SC2		27			45,2	18,8	25,4							

2.2.4. Site d'implantation du canal A2

Les essais ont été effectués tout le long du couloir d'écoulement naturel qui limite au sud la cuvette de Fidjrossé (localité Ajoutin).

La stratigraphie montre les mêmes conditions de sous sol rencontrées au site d'Akogbato, mais ici les caractéristiques géotechniques du sable tourbeux se trouvent jusqu'à 7-8 m à partir du fond du canal naturel.

3. Résultat final de la recherche des emprunts

Au regard de l'approvisionnement des matériaux à employer pour les remblais, la recherche menée par le consultant démontre qu'il y a plusieurs carrières disponibles, localisées à l'ouest et nord-ouest de Cotonou. Leurs distances de la zone d'implantation des ouvrages sont comprises entre 5 et 27 km.

Tableau n° 12 : Identification des carrières

Projet d'assainissement des bassins AA et XX de Cotonou :					
N°	Localité	Coordonnées géographiques			Observation
		Latitude Nord y	Longitude Est x	Altitude m IGN	
1	Dèkounbé	6° 22' 06''	2° 18' 47''	12	Site de dragage de sable moyen-grossier et fin, faiblement stratifié, de couleur brun / grise. Tourbe (vase) à 1-1,5 m de profondeur.
2	Fonsa	6° 21' 45''	2° 9' 30''	15	Sable fin siliceux et limoneux de couleur jaune-rougeâtre (ocre)
3	Ahoui Codji	6° 21' 24''	2° 7' 59''	8	Sable fin siliceux et limoneux de couleur jaune (ocre)
4	Sô-Ava	6° 29' 41''	2° 23' 55''	3	Sable grossier au fond de <i>rigole</i> à granulométrie moyen-grossier; couleur grise
5	Zinvié	6° 37' 46''	2° 20' 46''	12	Sable fin de couleur brunâtre

Les différents types de matériaux qui sont exploités aux environs de Cotonou pour être employés dans le bâtiment et les travaux publics sont essentiellement :

- Du sable
- Des sables silteux
- Des argiles plus ou moins sableuses auxquelles un processus latéritique a donné une teinte brun-rouge et que l'on a coutume d'appeler au Bénin « *terre de barre* »
- Des sables fins siliceux
- Des argiles de différentes qualités

Compte tenu de la nature des remblais à exécuter, il a été procédé à la recherche de gîtes de sable et de sables silteux. Ainsi, la prospection a été effectuée pour la recherche des gîtes de matériaux utilisables en remblai dans les régions de Fonsa, de Dèkounbé, de Ahouicodji, de Zinvié et de Sô-Ava. Au niveau de chaque gîte retenu des puits manuels ont été exécutés suivant un maillage adéquat. L'examen visuel des puits réalisés a permis de définir pour chacun d'eux :

- L'épaisseur de la couverture de terre végétale
- L'épaisseur et la nature des matériaux éventuellement exploitables.

Dans la carrière de sable de Sô-Ava située à 4,2 Km de Akassato, le sable est ramené par l'eau pendant la crue dans la rivière. La quantité de sable exploité est de 150 m³ par jour.

Des prélèvements d'échantillons de matériaux jugés les plus représentatifs ont été effectués par carrière pour être soumis aux essais de laboratoire, à savoir :

- Analyse granulométrique
- Limite d'Atterberg
- Proctor modifié
- CBR imbibé à 96 heures

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau n° 13 : Analyses des sables

DESIGNATION d'analyse		Sable de Dèkounbé	Sable silteux de Fonsa	Sable silteux de Ahoui Codji	Sable de Sô Ava	Sable de Zinvié
Granulometrie	% < 5mm					
	% < 2mm				93.5	
	% < 1.25mm	96		99	76.5	97
	% < 0.40mm	57	69.5	67.5	17.5	62.5
	% < 0.315mm	28	40	37.5	7	49
	% < 0.160mm	11	21	20	1.5	32.5
	% < 0.080mm	1.5	12	12.5	1	18
Limites d'Atterberg	WL (%)					
	IP					
Eq. de Sable	ES (%)	80	21	18	93	17
PROCTOR Modifié	γ_{dmax} (T/m ³)	1.71	1.91	1.925	1.615	1.89
	Wopt (%)	13.3	11.1	11.6	16.8	11.9
Poids spécifiques	γ_s (T/m ³)	2.66	2.66	2.64	2.65	2.62
CBR à 96 h d'imbibition	100%OPM	23	55	70	20	75
	95%OPM	15	29	35	15	55
	Gonfl. (%)	0	0	0	0	0
	W (%)	19.3	16.3	14.1	22.5	15.2

Tableau n° 14 : Volumes d'exploitation

Localisation des CARRIERES	VOLUME Indicatif (m³)
Sable de <i>Dèkounbé</i>	92. 160
Sable silteux de <i>Fonsa</i>	56. 640
Sable silteux de <i>Ahoui Codji</i>	167. 040
Sable de <i>Sô-Ava</i>	N'a pas pu être estimé
Sable de <i>Zinvié</i>	53. 120

On estime que la capacité de toutes les carrières citées peut être augmentée.

Pour le remblayage prévu dans le cadre du projet d'assainissement des bassins AA et XX les carrières de So-Awa ou de Zinvié pourront être de préférence utilisées.

4. Conclusions

Le tableau 15 donne le cadre récapitulatif des activités géotechniques effectuées. Les études ici présentées représentent la base pour le dimensionnement des fondations des ouvrages de traversée et drainage prévus.

Les essais effectués indiquent la présence de formations instables jusqu'à la profondeur investiguée (30 m). Cela suggère de procéder au dimensionnement des fondations des ouvrages avec une certaine prudence. Particulièrement, pour les fondations profondes il sera nécessaire d'envisager des essais de chargement à effectuer par l'entreprise lors du démarrage des travaux.

4.1 Pont de Mènontin

La portée totale prévue pour l'ouvrage est de 30 m, à réaliser en trois travées indépendantes de 10 m posées sur deux piles et deux culées. Même avec cette portée, plus que suffisante pour le débit de projet, les culées devront être basées dans la zone marécageuse et sur des terrains vaseux. Des fondations sur pieux seront donc nécessaires pour les piles et culées.

Les trois sondages réalisés sur la route de Godomey-Mènontin montrent qu'aucune des couches de terrain ne permet de faire travailler les pieux à la pointe. En effet les argiles n'offrent pas une résistance suffisante, et les sables rencontrés n'ont pas une épaisseur suffisante ou sont des sables de remblai.

Les pieux résisteront donc essentiellement par frottement latéral. Le dimensionnement des pieux, incluant diamètre, longueur et calcul du béton armé sera donné dans le rapport technique final.

4.2 Fondations pour dalots et canaux

Il s'agit de structures relativement légères et dotées de base très large. Une fondation superficielle sera donc suffisante, mais aux conditions suivantes :

- une purge étendue à toute la surface de fondation doit être effectuée sur une profondeur de quelques mètres pour enlever les matériaux de nature tourbeuse et les remplacer avec du sable

- une couche de matériau filtrant d'au moins 20 cm devra être posée sous la fondation en béton
- toutes les structures en béton armé, incluant dalots, canaux et caniveaux, devront être réalisées par tronçons séparés par des joints de rupture, afin d'en garantir la flexibilité en cas de tassements différentiels.

Tableau 15 : Cadre de synthèse des activités exécutées

Bassin	versant	Site	Ouvrage en projet	Activité géotechnique																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
				SC			PD				EP	ES	Echantillonnage et essais au laboratoire																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
				1	2	3	1	2	3	4			E _i		E _r																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
													Oedométrie	Cisaillement UU	Poids spécifiques Y _v / Y _v / Y _v	Teneur en eau naturelle w	Limites d'Atterberg			Equivalent de sable	Granulometrie																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

GM = Godomey-Menontin RI = Route inter-états X3 = Bas-fond du bassin XX-Agla le long la route inter-états A2 = Bas-fond du bassin AA-Fidjrossè RF= Route Fidjrossè AKO = Akogbato

SC = Sondage carotté PD = Pénétrömètre dynamique EP = Essai au préssiomètre ES = Essai au scissomètre

E_i = Echantillon intact E_r = Echantillon remanié

γ_s / γ_d = Poids spécifiques W = Teneur en eau naturelle W_L = Limite de liquidité I_p = Indice de plasticité ES = Equivalent de sable Gr = Granulométrie

Bibliographie :

Marcel Forni

Fondations spéciales et reprise en sous-œuvre.

Eyrolles. Paris, **1981**

Pietro Colombo

Elementi di geotecnica

Zanichelli. Bologna, **1979**

République populaire du Bénin.

Ministère de l'Industrie et de l'Energie.

Office béninois des Mines.

Notice explicative de la carte géologique 1 : 1.200.000.

Feuilles Pira-Save-Abomey-Zagnanando-Lokossa-Porto Novo. 1^{ère} édition **1989**. Mémoire n°3

Carte géologique.

Feuille Lokossa-Porto Novo. Projet F.E.D. N5100-11-13-015.

Projet réalisé de octobre **1984** à mai **1987**. Fond topographique des feuilles au 200.000 NB

XIV Lomé et NB 31 XV Porto Novo éditées par l'Institut Géographique National-IGN. Paris

Délégation de la Commission européenne en République du Bénin - Cotonou.

Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics

Projet d'assainissement des Bassins XX-AA de Cotonou.

Phase II de la campagne de sondages et essais géotechniques.

CNERTP. **1999**

Annexe 1 : monographies des sites et résultats

1. bassin XX – site Godomey - Menontin

2. *bassin XX – site Route Inter-états*

3. *bassin XX – canal X3*

4. bassin AA- site Fidjrossé nord

5. *bassin AA- site Fidjrossé sud*

6. bassin AA- site station de pompage

7. *bassin AA- canal A2*

Annexe 2 : documentation photographique



Photo 1 : site n°1 de Godomey-Menontin : essais au préssiomètre à côté du sondage SC3



Photo 2 : chantier sur le site n°2 à côté de la route inter-états



Photo 3 : site n°2 - passerelles et plate-forme au dalot de la route inter-états



Photo 4 : site n°3 - essais au pénétromètre dynamique le long de la route de Fidjrossè.



Photo 5 : plate-forme pour les activités au site n°5 (Akogbato)



Photo 6 : Essais au pénétromètre à Akogbato (site n°5)



Photo 7 : Equipement pour l'essai au scissomètre.



Photo 8: essais au pressiomètre à Akogbato (site n°5)



Photo 9 : Sondage carotté au site n°5 (Akogbato)

Annexe 3 : rapport du CNERTP