

RÉPUBLIQUE DU BÉNIN



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (MESRS)

UNIVERSITÉ D'ABOMEY – CALAVI (UAC)

École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC)

CENTRE AUTONOME DE PERFECTIONNEMENT (CAP)

MÉMOIRE DE FIN DE FORMATION

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION EN
GÉNIE CIVIL

Option : Bâtiments et Travaux Publics (BTP)

THÈME :

**FORMULATION D'UN NOUVEAU MATÉRIAU ROUTIER PAR LA
TECHNIQUE DE LITHO STABILISATION DE LA TERRE DE
BARRE DE SISSINKPA (ADJOHOUN) PAR AJOUT DU SABLE
GRANITIQUE 0/5 DE TAN (ZAGNANADO)**

Rédigé et soutenu le 21/10/2024 par :

Augustin MAHINO

Sous la direction de :

Superviseurs

1. Dr Ing. Kocouvi Agapi HOUANOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant Chercheur à l'EPAC.
2. Dr Ing. Serge Kpomagbé DOSSOU, Chercheur en Génie Civil.

Membres du Jury :

Président : Pr OLODO Emmanuel, Professeur Titulaire des Universités du CAMES

- Membres** :
1. Dr Ing. DOKO K. Valéry, Maître de Conférences du CAMES, Chef Département Génie Civil de l'EPAC/UAC
 2. Dr Ing. Kocouvi Agapi HOUANOU, Maître de Conférences du CAMES
 3. Dr Ing. Serge Kpomagbé DOSSOU, Chercheur en Génie Civil

Année académique : 2020-2022

DEDICACES

A Dieu Tout Puissant, créateur du ciel et de la terre
Tu es Grand, digne de gloire et de louange. Merci pour toutes les merveilles que tu accomplies dans ma vie chaque jour.

Guide mes pas dans cette nouvelle direction que s'apprête à prendre ma vie.

A mon père Mahinou AMOUSSOUGBO, pour avoir été présent au bon moment. Merci pour les valeurs inculquées, ton soutien, dévouement et tous tes sacrifices. Puisse Dieu te combler de ses bénédictions, de sa grâce à jamais.

A ma feuè mère Maïbouinou YÉNIKO, qui n'a ménagé aucun effort pour m'assurer un bel avenir. Tes sacrifices ne sont pas vains. De ta demeure éternelle, veilles sur tes enfants.

REMERCIEMENTS

Au terme de cette formation, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à Dieu tout Puissant, le rédempteur, le Saint d'Israël, qui nous comble de sa bénédiction, son amour, sa grâce, tous les jours de notre vie. Honneur, magnificence et gloire à son nom au plus haut des cieux. Père, Dieu trois fois Saint, accepte nos remerciements.

Profonde reconnaissance et remerciements chaleureux :

À Nos Encadreurs,

Monsieur, **DEDJINOUE D. S. Calixte**, Ingénieur de Conception en Génie-Civil, Directeur du bureau d'Etudes TECKNICART Ingénieurs conseils. Vos conseils et orientations, votre grand souci d'apporter une innovation orientée sur le choix des matériaux locaux en construction routière, nous ont donné une impulsion à l'élaboration de ce travail. Que l'Eternel des armées vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises ;

Monsieur, **GBAGUIDI T. Septime Roch**, Ingénieur d'État en Génie-Civil, Expert Géotechnicien agréé près la cour d'Appel et tribunaux du Bénin, Retraité du CNERTP (Laboratoire national du BÉNIN), Consultant indépendant, merci pour vos apports très significatifs qui ont enrichis ce travail.

À Nos Superviseurs,

Dr Ing. Kocouvi Agapi HOUANOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur de l'EPAC/UAC, veuillez recevoir ici, notre profonde reconnaissance pour votre disponibilité, vos suggestions et recommandations qui sont les pistes qui mènent vers la réussite de ce travail. Veuillez recevoir notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements. Que l'Eternel des armées, le Dieu tout puissant vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises ;

Dr Ing. Serge Kpomagbé DOSSOU, Chercheur en sciences de l'Ingénieur, Collaborateur externe de l'EPAC, merci de recevoir toute ma profonde gratitude pour votre disponibilité parfois à des moments de repos, vos suggestions et recommandations m'ont permis d'améliorer ce travail.

✓ **Au corps Enseignant de CAP/EPAC/UAC,**

Nos remerciements à l'endroit de tous les professeurs du CAP/EPAC en général et en particulier, ceux du Département de Génie Civil pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont donné. Il s'agit notamment du :

Professeur Guy Alain ALITONOU, Professeur titulaire des Universités du CAMES, Directeur de l'EPAC ;

Professeur Fidèle Paul TCHOBO, Professeur titulaire des Universités du CAMES, Chef du Centre de Perfectionnement Autonome (CAP), Enseignant-Chercheur à l'EPAC ;

Dr Valéry DOKO, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Chef du Département de Génie Civil à l'EPAC, vos conseils m'ont réconforté pendant toute notre formation. Recevez ici, l'expression de ma gratitude ;

Professeur Mohamed GIBIGAYÉ, Professeur titulaire des Universités du CAMES, pour ses sages conseils ;

Professeur Emmanuel OLODO, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;

Professeur ADJOVI C. Edmond, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;

Professeur Victor GBAGUIDI, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;

Professeur Gérard GBAGUIDI AÏSSÈ, Professeur titulaire des Universités du CAMES :

Dr Adolphe TCHEHOUALI, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;

Dr Ing. KIKI TANKPINOU Yvette, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;

Dr Ing. Victor ANANOUEH ;

Dr Ing. David Télé OLODO ;

Dr Ing. Daniel Yémalin AGOSSOU ;

Dr Ing. Wilfried HODÉ ;

Je tiens à remercier tout le corps enseignant du département de Génie Civil de L'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi pour leur dévouement et la qualité de leurs enseignements.

✓ **Une note particulière de gratitude :**

- À **M. AVODAGBÉ Aristide**, Ingénieur Génie Civil, Spécialiste en Matériaux de construction, Directeur Général du laboratoire ATS SARL, tes conseils, ton

soutien sous diverses formes ont été le soubassement de ma formation, recevez ici, toute ma gratitude ;

- À tout le personnel du laboratoire de Chantier OFMAS INTERNATIONAL à PORTO NOVO ;
- À tout le personnel du laboratoire BCTP SARL à travers son Directeur Général, M. DJOSSOU Patrice ;
- Mention Spéciale à Mrs. BÊVIDÉ, ÉSSÉDÉ GANDONOU, HILAIRE DJOSSOU ;

Profonde gratitude à toutes les familles AMOUSSOUGBO, MAHINO, YÉNIKO et DANGBOÉ pour vos soutiens.

J'adresse aussi mes sentiments de profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin m'ont aidé d'une manière ou d'une autre tout au long de ma formation et pendant la rédaction de ce document.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Les différentes couches de chaussées	7
Figure 1.2.	Structure type d'une chaussée souple	8
Figure 1.3.	Structure type d'une chaussée semi-rigide	9
Figure 1.4.	Structure type d'une chaussée rigide	10
Figure 1.5.	Fonctions à court terme de la couche de forme	11
Figure 1.6.	Carte géographique schématique du socle cristallin du Bénin	10
Figure 1.7.	Carte géologique du Bénin	11
Figure 1.8.	Schéma morphologique de la ++ des unités géographiques (in M. SLANSKY - 1959)	19
Figure 2.1.	Situation géographique du projet	32
Figure 2.2.	Organigramme du Bureau d'études TECKNICART INGENIEURS CONSEILS	37
Figure 2.3.	Indication du Bureau d'études TECKNICART INGENIEURS CONSEILS.	38
Figure 2.4.	Opération de tamisage	50
Figure 2.5.	Illustration des différents paramètres des limites d'Atterberg	51
Figure 3.1.	Fuseau granulaire du sable silteux	59
Figure 3.2.	Courbe granulométrique de la Terre de Barre	62
Figure 3.3.	Courbe granulométrique de la TB représentée dans le fuseau de la terre de barre en place	60
Figure 3.4.	Courbe de Limites d'Atterberg de la Terre de Barre	65
Figure 3.5.	Courbe granulométrique du Sable Concassé 0/5	74
Figure 3.6.	Intégration du sable Concassé étudiée dans le fuseau granulométrique.....	75
Figure 3.7.	Courbe Proctor Modifié du sable concassé	76
Figure 3.10.	Courbe Proctor de la Terre de barre et des différents mélanges	84
Figure 3.11	Variation de la densité sèche pour la terre de barre et des différents mélanges étudiés.....	84
Figure 3.12.	Variation de la teneur en eau pour la Terre de barre et des différents mélanges étudiés à plusieurs pourcentages.....	85

Figure 3.13. Comportement de L'indice de plasticité de la Terre de barre et des différents mélanges étudiés.	87
Figure 3.14. Variation du CBR pour la Terre de barre et pour les différents mélanges étudiés à plusieurs pourcentages.....	82
Figure 3.15. Courbe Contrainte – Déformations de la terre de barre par l'essai de cisaillement direct.....	93
Figure 3.16. Courbe Contrainte – Déformations du sable concassé par l'essai de cisaillement direct.....	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Quartiers de ville des cinq arrondissements	34
Tableau 2.1. Liste des rues du Projet Asphaltage de Porto-Novo lot 15A	39
Tableau 2.2 Spécification recommandées pour la couche de forme CCTP Asphalt. LOT15A	52
Tableau 2.3 Récapitulatif des essais à réaliser sur la terre de barre	57
Tableau 3.1. Récapitulatif des essais des paramètres géotechniques du silteux	68
Tableau 3.2. Résultat de l'analyse granulométrique sur la TB.....	70
Tableau 3.3. Intégration de la TB étudiée dans les bornes de celle en place	71
Tableau 3.4. Résultats des Limites d'Atterberg de la TB étudiée.....	73
Tableau 3.5. Essai Proctor Modifié de la TB étudiée.	74
Tableau 3.6. CBR de la TB étudiée.....	74
Tableau 3.7. Comparaison des caractéristiques de la TB étudiée et recommandations du CCTP du projet.....	63
Tableau 3.8. Comparaison des caractéristiques de la TB étudiée et Résultats du sable silteux.....	76
3	
Tableau 3.9. Résultat de l'analyse granulométrique du sable Concassé	83
Tableau 3.10. Coefficient de courbure et d'uniformité le sable Concassé	85
Tableau 3.11 Essai Proctor du sable concassé.	85
Tableau 3.12. Essai CBR sur le sable concassé	86
Tableau 3.13. Récapitulatif des résultats d'essais sur le sable concassé	86
Tableau 3.14. Résultat de l'analyse granulométrique de la Terre de barre et des Terres de barre améliorés à plusieurs pourcentages.	88
Tableau 3.16 Résultats de Limites d'Atterberg de la Terre de barre et des Terres de barre améliorés à 15%, 20%, 25% et 30%	95
Tableau 3.17 Tableau récapitulatif des résultats d'identification des Matériaux crus et Mélanges à 15%, 20%, 25% et 30%	100

Tableau 3.18. Résultat de Contrainte et déformations sur le sable concassé de TAN	103
Tableau 3.19. Résultat de Contrainte et déformations sur la terre de barre de Sissinkpa	105
Tableau 3.20. Résultats nouveau matériau (TB75SC25) comparés aux Exigences du CCTP/Asphaltage.	107
Tableau 3.21. Estimation de la mise en œuvre d'une couche de forme en silteux d'après les propositions de l'entreprise OFMAS sur le lot 15 A Asphaltage.	110
Tableau 3.22. Estimation de la mise en œuvre d'une couche de forme en TB70SC30 d'après les propositions de l'entreprise OFMAS sur le lot 15 A Asphaltage.....	110

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 2.1:</i> Silteux mis en dépôt.	47
<i>Photo 2.2:</i> Terre de barre retrouvée sur place a la côte plate-forme et mis en dépôt.	46
<i>Photo 3.1:</i> Séchage de la Terre de barre et préparation des échantillons pour Essai.	67
<i>Photo 3.2:</i> Compactage Eprouvettes CBR.....	72
<i>Photo 3.3:</i> Séchage du sable Concassé et préparation des échantillons pour Essai.	75
<i>Photo 3.4:</i> Analyse granulométrique des mélanges Terre de Barre et Sable Concassé..	83
<i>Photo 3.5:</i> Mélanges Terre de Barre et Sable Concassé à divers pourcentages.	85
<i>Photo 3.6 :</i> Ajouts d'eau sur les mélanges suivi de malaxage, compactage arasement de l'Essai Proctor.....	86
<i>Photo 3.7 :</i> Essai des limites d'atterberg sur les divers mélanges.....	90
<i>Photo 3.8:</i> Essai CBR sur les divers mélanges.....	92

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

Symbole	Désignation	Unités
CMOC	Teneur en matière organique par calcination	%
f	Taux de fine	%
f.IP	Module de plasticité	%
WL	Limite de liquidité	%
ω OPM	Teneur en eau optimale	%
WP	Limite de Plasticité	%
ω	Teneur en eau	%
e0	Indice des vides	MPa
Cs	Indice de recompressions ou de gonflement	MPa
Cc	Indice de compression	MPa
Cg	Coefficient de gonflement	%
c	La cohésion	MPa
v	Coefficient de Poisson	-
eo	Indice des vides du sol en place	%
CU	Coefficient d'uniformité	-
CC	Coefficient de Courbure	-
VBS	Valeur au bleu de méthylène	%
ES	Équivalence de sable	%
ICBR	Indice d'immersion	%
Cc	Coefficient de compressibilité	%
E	Module d'élasticité	MPa
Ec	Module de compression	MPa
Rc	Résistance à la compression	MPa
σ_c	Résistance à la compression axiale	MPa
σ_p'	Contrainte de pré consolidation	MPa
Eoed	Module œdométrique	MPa
τ_{max}	Contraintes maximales de cisaillement	MPa
E	Module d'Young	MPa

G	Le module de cisaillement	MPa
Eoed	Module œdométrique	MPa
σ_n	La contrainte normale	MPa
σ_p'	Contrainte pré consolidation	MPa
Eoedmoy	Modules œdométriques	MPa
ρ_d	Masse volumique apparente sèche	g/m ³
F	Effort/force	N
M	Masse	g
γ_s	Poids spécifique	g/cm ³
γ_h	Poids volumique apparent	g/cm ³
γ_d	Densité sèche	g/cm ³
d	Déflexion	m
h	Hauteur	m
Wr	Déformation résiduelle	m
Wt	Déformation totale	m
D	Diamètre	mm
Ac	Surface de section	mm ²
V	Volume	mm ³
γ_{dmax}	Densité sèche maximale	t/m ³
ϕ	L'angle de frottement interne	°
ε	Déformation	μ_{def}
P/N	PORTO-NOVO	
TECKNICART	Bureau d'études TECKNICART INGENIEURS CONSEILS	

TABLE DES MATIERES

Table des matières

DEDICACES i

i

REMERCIEMENTS..... ii

LISTE DES FIGURES..... v

LISTE DES TABLEAUX vii

LISTE DES PHOTOS..... ix

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITES ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE 5

1.1	GÉNÉRALITÉS SUR LA ROUTE	6
1.1.1	Historique	6
1.1.2	Rappels sur les constituants de la chaussée et rôle des couches.....	6
	Structure de chaussée	7
1.1.3	Les différents types de structures de chaussée	8
1.1.4	Définition et fonction d'une couche de forme.....	10
1.2	LES SABLES GRANITIQUES 0/5 EN TECHNIQUE ROUTIÈRE	12
1.2.1	Description sommaire du granite.....	12
1.2.2	Formation des sables	16
1.2.3	Ressources en terre de barre dans le Sud-Bénin.....	17
1.3	GÉNÉRALITÉS SUR LA STABILISATION DES SOLS EN GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE	19
1.3.1	Définition de la Stabilisation chimique et liant utilisés.....	20
1.3.2	Définition de la Stabilisation Mécanique et matériaux utilisés.....	21
1.3.3	Choix des stabilisants	22
1.3.4	Objectif et avantages des stabilisations.....	22

1.4	Bilan des travaux antérieurs sur l'utilisation de la méthode de litho stabilisation en assises de chaussées.....	24
-----	--	----

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU PROJET, CONTEXTE ET JUSTIFICATION, MATÉRIAUX D'ÉTUDES, MATÉRIELS ET MÉTHODES..... 27

2.1	PRÉSENTATION DU PROJET	28
2.1.1	Contexte et justification du projet	28
2.1.2	Objectifs du projet	28
2.1.3	Description sommaire de la zone de projet	29
2.1.4	Présentation des arrondissements concernés	30
2.1.5	Situation géomorphologique et pédologique de la zone de projet	31
2.1.6	Relief	31
2.1.7	Situation géographique.....	31
2.1.7	Présentation des rues du projet.....	33
2.1.8	Profils en travers type.....	35
2.2	PRÉSENTATION DU BUREAU D'ÉTUDES TECKNICART INGENIEURS CONSEILS	36
2.2.1	Historique	36
2.2.2	Organigramme	37
2.2.4	Domaines d'interventions.....	38
2.2.5	Missions réalisées	39
2.3	LES MATÉRIAUX D'ÉTUDES	43
2.3.1	Le sable silteux.	43
2.3.2	La terre de barre.....	45
2.4	MATÉRIELS MIS EN ŒUVRE POUR L'ÉTUDE	47
2.5	MÉTHODE D'ÉTUDES	48
2.4.1	Essais réalisés au laboratoire	48
2.4.2	Notion de fuseau granulaire.....	53

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DU RÉSULTATS D'ESSAIS SUR LES MATÉRIAUX, ANALYSES ET INTERPRETATIONS 55

3.1	RÉSULTATS D'ESSAIS SUR LE SABLE SILTEUX.....	55
3.2	ÉTUDE DE LA TERRE DE BARRE.....	57
3.2.1	Analyse granulométrique sur la terre de barre.	58
3.2.2	Détermination des limites d'Atterberg.....	60
3.2.3	Essai Proctor Modifié.....	61
3.2.4	Essai CBR.....	62
3.4.	LA TECHNIQUE DE LA LITHO STABILISATION.....	65
3.4.1	Définition.....	65
3.4.2	Mise en œuvre.....	65
3.5.	ETUDES SUR LE SABLE CONCASSÉ 0/5.....	67
3.5.1	Définition.....	67
	Le sable concassé 0/5 est obtenu du concassage des roches granitiques. Il est utilisé dans le projet routier dans plusieurs domaines tels que constituant des granulats pour mélange bitumineux, la production du béton hydraulique, les remblais hydrauliques aux droits des ouvrages d'assainissement ainsi que matériau constituant la structure des chaussées.....	67
3.5.4	Essai Proctor Modifié.....	71
3.5.5	Essai CBR.....	71
3.6	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTAS DE LITHOSTABILISATION.....	72
3.6.1	Matériau Terre de barre – Sable concassé.....	72
3.6.2	Analyse granulométrique des différents mélanges.....	73
3.6.3	Résultats des essais de Proctor modifié.....	76
3.6.4	Résultats des Limites d'Atterberg.....	79
3.6.5	Résultats du CBR.....	81
3.6.6	Tableau récapitulatif des Résultats d'Essais d'identification.....	83
3.6.7	Essai de cisaillement direct (Essai mécanique).....	83

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes

constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette	84
L'essai consiste à (selon la norme NF P94-071-1):.....	84
- Consolider l'éprouvette de section s dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (contrainte $\sigma = N/s$).....	84
- La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon.	84
- Cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.	84
- L'effort de cisaillement horizontal (T) est mesuré et la contrainte $\tau = T/s$ est calculée.	84
1. Sable concassé 0/5.....	84
Les résultats d'essai au cisaillement par la méthode directe obtenus sur le sable concassé 0/5 sont consignés par le Procès-verbal ci-dessous :	84
2. Terre de barre de Sissinkpa	86
3.6.8 Conclusion.....	87
3.7 COMPARAISON FINANCIÈRE ENTRE L'UTILISATION DU TB75SC25 ET LE SILTEUX EN COUCHE DE FORME.	88
3.7.1 Devis quantitatif et estimatif de la mise en œuvre du silteux et du matériau TB75SC25 sur le tronçon choisi.	89
CONCLUSION GENERALE.....	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	94

Résumé

Dans la majorité des Pays en Afrique et en l'occurrence le BÉNIN, les graveleux latéritiques et le sable silteux représentent les matériaux par excellence utilisés pour la réalisation des couches d'assise de chaussée. Mais il se trouve aujourd'hui que, dans grand nombre de projets routiers dans la partie méridionale de notre pays le BÉNIN, la question de disponibilité de latérites et du sable silteux se pose de plus en plus avec acuité. Face à l'épuisement de ces matériaux de bonne qualité à l'état naturel, il est impérieux de trouver un matériau de proximité répondant aux normes en vigueur. Ainsi, cette étude est initiée pour formuler un matériau routier par la technique de la Litho stabilisation de la terre de barre de Sissinkpa (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique concassé 0/5 de Tan (ZAGNANADO). Afin d'atteindre les résultats escomptés, la méthode expérimentale est basée sur les normes et règlements en vigueur dans le domaine routier. Les résultats obtenus ont permis de mettre en place plusieurs matériaux tels que les mélanges constitués de : TB100SC0, TB85SC15, TB80SC20, TB75SC25 et TB70SC30. Les passants au tamis 80 microns sont de 50% ; 40% ; 37% ; 33% ; 30%, les indices de plasticité sont de 17% ; 16% ; 16% ; 15% ; 15%, les valeurs au bleu de méthylène sont de 0,1 ; 0,1 ; 0,1 ; 0,1 ; 0,1, les densités sèches sont de 1,88 t/m³ ; 1,97 t/m³ ; 1,98 t/m³ ; 1,98 t/m³ ; 2,00 t/m³, les indices CBR à 95% OPM sont de 22% ; 25% ; 32% ; 48% et 53% respectivement pour les mélanges suscités. Ces résultats comparés aux exigences du CEBTP 1984 amélioré 2019, le mélange constitué de 75% de terre de barre et de 25% de sable concassé 0/5 (TB75SC25) peut être utilisé en couche de forme des chaussées souples.

Mots clés : Terre de barre ; Litho stabilisation ; Mélanges ; Sable granitique concassé 0/5 ; couche de forme.

Abstract

In the majority of countries in Africa especially in Benin, lateritic gravel and silty sand represent the materials mainly used for the creation of road base layers. But it shows out today that, in a large number of road projects in the southern part of our country Benin, the question of availability of laterites and silty sand is becoming more and more acute. Facing the exhaustion of these good quality materials in their natural state, it is imperative to find a local material that meets current standards. Then, this study is initiated to suggest a road material by the stabilization lithography of the ferralitic soil (Terre de barre) of Sissinkpa (ADJOHOUN) with crushed granite sand 0/5 of Tan (ZAGNANADO). In order to achieve the expected results, the experimental method is based on the standards and regulations in force in the road sector. The results obtained have allowed implementing several materials such as mixture consisting of: TB100SC0, TB85SC15, TB80SC20, TB75SC25 and TB70SC30. The passage to the 80 micron sieve are of 50% ; 40% ; 37% ; 33% ; 30%, the plasticity indices are: 17% ; 16% ; 16% ; 15% ; 15%, the methylene blue values are: 0,1 ; 0,1 ; 0,1 ; 0,1 ; 0,1, the dry densities are: 1,88 t/ m³ ; 1,97 t/m³ ; 1,98 t/m³ ; 1,98 t/m³ ; 2,00 t/m³, the CBR indices at 95%OPM are 22% ; 25 % ; 32% ; 48% et 53% respectively for the mixture mentioned. These results compared to the requirements of CEBTP 1984 improved in 2019, the mixture consisting of 75% "terre de barre" and 25% crushed granite sand 0/5 (TB75SC25) may be used as a subgrade for flexible pavements.

Keywords: Terre de barre; Stabilization lithography; Mixture; Crushed granite sand 0/5; subgrade.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La route est un facteur de communication, de transport, de développement socio-économique et d'intégration sous régionale et régionale. L'amélioration de nos conditions de vie et notre cadre de vie passe par la bonne circulation de nos biens et services. C'est ainsi que dans le cadre de son programme d'action gouvernementale, l'Etat Béninois a initié le projet Asphaltage qui vise à l'aménagement de voiries primaires, secondaires et tertiaires dans plusieurs villes du Bénin.

Pour la réalisation dans les règles de l'art et la pérennisation de ces infrastructures routières, Leur dimensionnement intègre plusieurs paramètres parmi lesquels l'on peut citer : le climat, le relief, l'hydrologie et l'hydrographie du cadre du projet, le trafic que la route est destinée à recevoir puis la disponibilité des matériaux de viabilité. De nos jours dans certaines régions de notre Pays, notamment la partie méridionale, la disponibilité de matériaux de viabilité se pose de plus en plus avec acuité dans les projets routiers soit à cause de leur qualité, soit à cause de la distance d'exploitation. Ces matériaux doivent avoir des caractéristiques bien définies pour répondre aux spécifications des clauses de cahiers de charge sans occulter la préservation de l'environnement.

Or aujourd'hui, il n'est pas rare de constater que pour les structures de chaussées, les mouvements de terre entraînent une grande évacuation de terre en place d'une part et d'un apport excessif de terre d'autre part. La raison est que le matériau en place ne répond pas aux exigences fixées par les spécifications techniques, et qu'il faudra aller chercher en contrepartie un matériau plus adapté, souvent le sable silteux, le graveleux latéritique ou les GNT (Graves Non Traités). Cette situation ayant entraîné l'exploitation abusive des carrières, crée de nos jours la rareté de ces matériaux aux propriétés mécaniques adaptés aux contraintes subies par la chaussée. Au même moment, des millions de mètre cube du sol en place sont évacués puisque ne disposant pas des propriétés spécifiques recherchées. Cette dernière n'est pas sans incidence financière sur le coût global du projet.

Que faire pour permettre au sol en place d'être utilisé en couche de forme ou de fondation au détriment du silteux par exemple ?

La recherche de solution à ce problème a orienté notre étude dans le cadre de la rédaction de notre mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie-civil sur le thème « **Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO).**

L'objectif général est d'améliorer les caractéristiques de la terre de barre en place ou de la carrière de Sissinkpa voisine de PORTO NOVO afin qu'elle réponde aux caractéristiques requises pour être utilisé en couche de forme en remplacement du silteux.

Il s'agira de façon spécifique :

- D'analyser les propriétés physiques et mécaniques de la terre de barre crue.
- D'analyser les propriétés physiques et mécaniques de la terre de barre amélioré par les techniques de litho stabilisation ;
- Déterminer le pourcentage de sable concassé à incorporer qui donnerait une meilleure portance en couche de forme et fondation. Dégager le gain économisé dans l'emploi de ce nouveau matériau formulé comparativement à l'utilisation du sable Silteux ou autres matériaux.

Pour mener à bien cette étude, la procédure suivante a été adoptée :

- ✓ Une étude statistique permettant de déterminer le fuseau granulaire du sable silteux sur la base de 25 échantillons analysés ;
- ✓ Une étude statistique permettant de déterminer le fuseau granulaire de la terre de barre sur la base de 25 échantillons analysés ;
- ✓ Une étude statistique permettant de déterminer le fuseau granulaire du sable concassé de Tan sur la base de 25 échantillons analysés ;

- ✓ Descente sur le terrain pour prélèvement des matériaux (sable concassé de Tan et Terre de barre de Sissinkpa (Adjohoun)) ;
- ✓ Etude de la terre de barre : Essais pour identification de matériau (Analyse Granulométrique (AG), Limites d'Atterberg (LA), et Valeur au Bleu de méthylène sur le Sable (VBS) ; des Essais de portance (Optimum Proctor Modifié (OPM), CBR) ; Confirmation de cet échantillon dans le fuseau granulaire des sols en place relevés sur l'ensemble du lot 15A ;
- ✓ Etude d'identification sur le sable concassé de Tan : Analyse Granulométrique (AG), l'Equivalent de Sable (ES) et la Valeur au Bleu de méthylène sur le Sable (VBS) ; des Essais de portance (Optimum Proctor Modifié (OPM), CBR) ; Confirmation de cet échantillon dans le fuseau granulaire du sable concassé 0/5 :

Après avoir mené ces travaux de base nous allons procéder à :

- Une étude de la terre de barre améliorée au sable concassé 0/5 de Tan à plusieurs pourcentages.
- Une analyse des résultats obtenus.
- Comparaison du coût et avantages de la mise en œuvre du nouveau matériau formulé.

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITES ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

OJECTIF DU CHAPITRE

L'objectif de ce chapitre est de regrouper sous forme de brefs rappels didactiques, les généralités sur les routes et les différentes méthodes de traitement des sols.

1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA ROUTE

1.1.1 Historique

L'histoire de la route est attachée au développement de l'humanité et des civilisations car de tout temps, l'homme a eu besoin de se déplacer. Elle est également liée à la volonté d'expansion des nations et donc aux besoins de leurs armées. Il était alors nécessaire de déplacer des troupes et de l'armement rapidement à travers de nouveaux pays.

Dans ces conditions, la route devait disposer d'une certaine résistance mécanique. Malheureusement, les voies d'alors ont montré leurs limites à supporter les sollicitations. La notion de chaussée a alors été inventée. Avec le développement des engins lourds, les premiers problèmes ont surgi :

- apparition de nids de poule,
- poinçonnement et affaissement de la chaussée aux premières pluies.

La structure de la chaussée était donc mal adaptée. Une mutation s'imposait pour aboutir à une route moderne. Elle a été introduite par l'emploi des matériaux à granulométrie continue et de calibre déterminé puis avec l'émergence des matériaux traités au ciment.

Progressivement, la route est alors devenue un patrimoine pour les Etats ; elle a donc commencé par faire l'objet d'acte administratif de classement pris dans des formes réglementaires, soit préalablement à sa construction, soit postérieurement.

1.1.2 Rappels sur les constituants de la chaussée et rôle des couches

Une structure de chaussée est un ensemble de couche de matériaux de qualités variables empilées les unes sur les autres pour résister aux sollicitations du trafic. Le rôle d'une chaussée est de reporter convenablement sur le sol support, les efforts provenant du trafic. La chaussée doit donc avoir une épaisseur avec des caractéristiques telle que la pression verticale transmise au sol support soit suffisamment faible. En fonction du sol support et du trafic on peut constituer la chaussée par la superposition de plusieurs couches de caractéristiques mécaniques croissantes. En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol :

- ⊗ Couche de forme ;
- ⊗ Couche de fondation ;
- ⊗ Couche de base ;
- ⊗ Couche de surface.

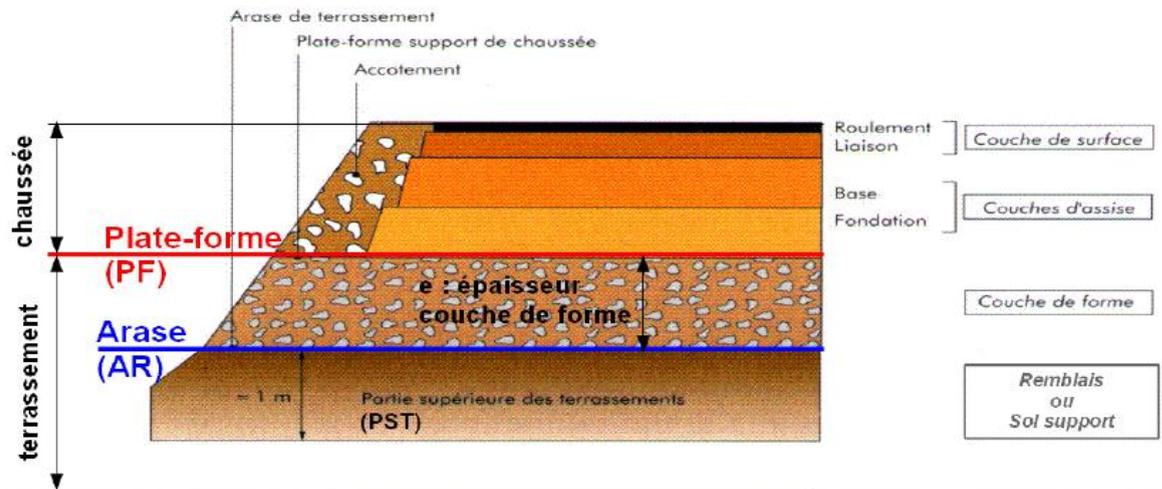


Figure 1.1. Structure type d'une chaussée

Source : NF P 98-086 [30]

Structure de chaussée

- **La partie supérieure des terrassements (PST)** désigne la zone supérieure des terrains en place ou apportés et fait environ 1m d'épaisseur. La plate-forme de la PST est l'arase de terrassement dit AR.
- **La couche de forme (CDF)** ne fait pas partie intégrante de la chaussée mais bien de son sol support. Son rôle à court terme est d'assurer le nivellement, la traficabilité et à long terme de garantir un certain niveau de portance. Elle constitue la plate-forme support de chaussée appelée PF.
- **Les couches d'assises** sont la couche de fondation et la couche de base. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.
- **La couche de surface** est constituée d'une couche de roulement sur laquelle s'exercent directement les agressions du trafic et du climat, et d'une couche de liaison

permettant l'accrochage aux couches d'assise. La couche de surface doit garantir le confort et la sécurité des usagers grâce à l'uni, l'adhérence et l'évacuation des eaux de ruissellement. Elle maintient l'intégrité de la structure et protège les autres couches des infiltrations d'eau par son étanchéité.

1.1.3 Les différents types de structures de chaussée

La structure d'une chaussée est l'ensemble des couches granulaires de qualité variable, empilées les unes sur les autres pour résister aux sollicitations du trafic.

Selon la formation des différentes couches et leur disposition dans la structure de la chaussée, on classe en plusieurs types les structures de chaussée. Le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée du LCPC distingue les structures suivantes : **souples, semi-rigides, rigides, inverses, mixtes, et bitumineuses épaisses**. Mais, du point de vue de la diffusion des pressions, il existe deux modes de fonctionnement mécanique des chaussées à savoir les **chaussées souples** et les **chaussées rigidifiées** (rigides et semi-rigides).

Les chaussées souples

Les chaussées souples ont une couverture bitumineuse relativement mince, parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. Ces dernières, en l'absence de cohésion au sein des matériaux qui les constituent sont très flexibles.

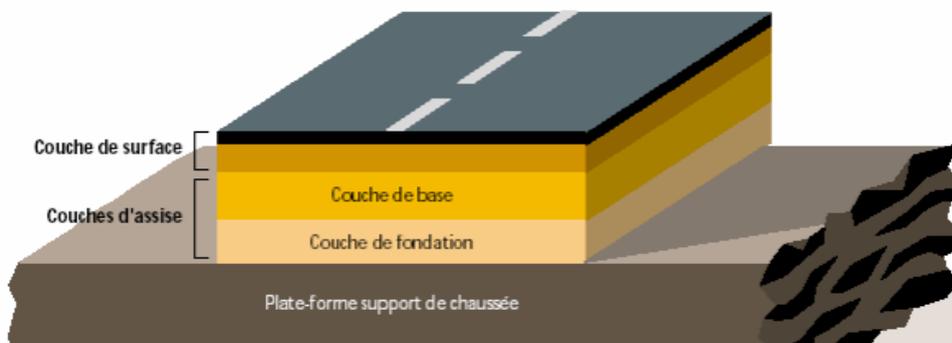


Figure 1.2. Structure type d'une chaussée souple

La charge exercée sur la couche de surface est entièrement transmise au sol support de façon non uniforme avec une faible diffusion latérale. Les chaussées souples ne pouvant

mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, l'étalement des efforts verticaux sur le sol support est modéré. Ceci a pour effet de localiser les pressions dans les couches sous-jacentes de manière à ce que l'effort sur la plate-forme soit compatible avec la résistance de l'infrastructure et du sol. Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa plastification qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée.

Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Encore appelées chaussées semi-rigides, elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH) ; l'assise peut être disposée en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). La structure-type est illustrée sur la figure.

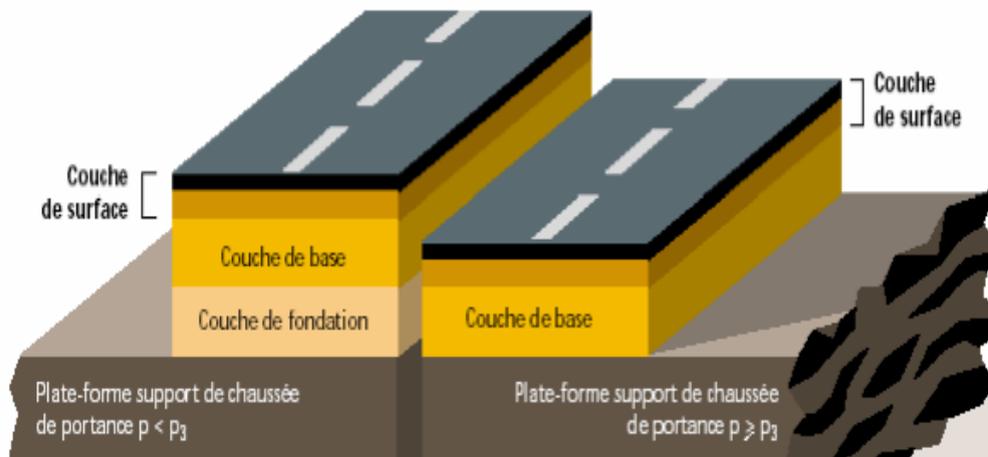


Figure 1.3. Structure type d'une chaussée semi-rigide

Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'une dalle de béton de ciment Portland reposant sur un sol compacté, ou sur une mince couche de fondation de pierre ou de gravier concassé, ou sur une fondation stabilisée. La rigidité du revêtement permet de répartir les charges sur une grande superficie de la fondation. L'effet de répartition de la charge sur le sol support est alors très important. Les revêtements en béton ne

requièrent pas de fondations épaisses, le rôle de ces dernières se bornant à empêcher les remontées de sol entre les dalles.

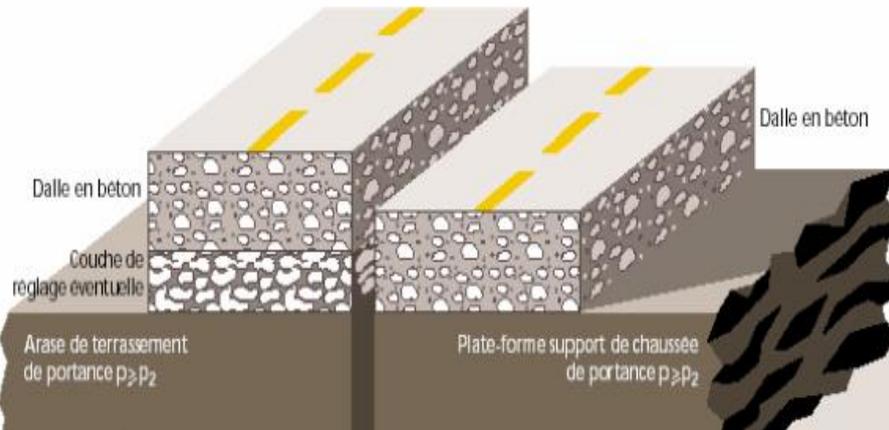


Figure 1.4. Structure type d'une chaussée rigide

Par contre, l'amortissement très élevé des contraintes verticales dues aux charges est compensé par l'apparition, au sein de la couche traitée, de contraintes de compression et surtout de traction à la partie inférieure.

Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues.

1.1.4 Définition et fonction d'une couche de forme

La couche de forme est une structure permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée. La couche de forme répond à la fois à des objectifs :

- à court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée)
- à long terme (lorsque l'ouvrage est en service).

Selon le cas de chantier, on cherchera à assurer, avec la couche de forme, l'ensemble ou certaines des fonctions suivantes :

Fonctions à long terme

Guide de Terrassement Routier GTR, Fascicule 1, Juillet 2000, 2^{ème} Edition. Page 51.

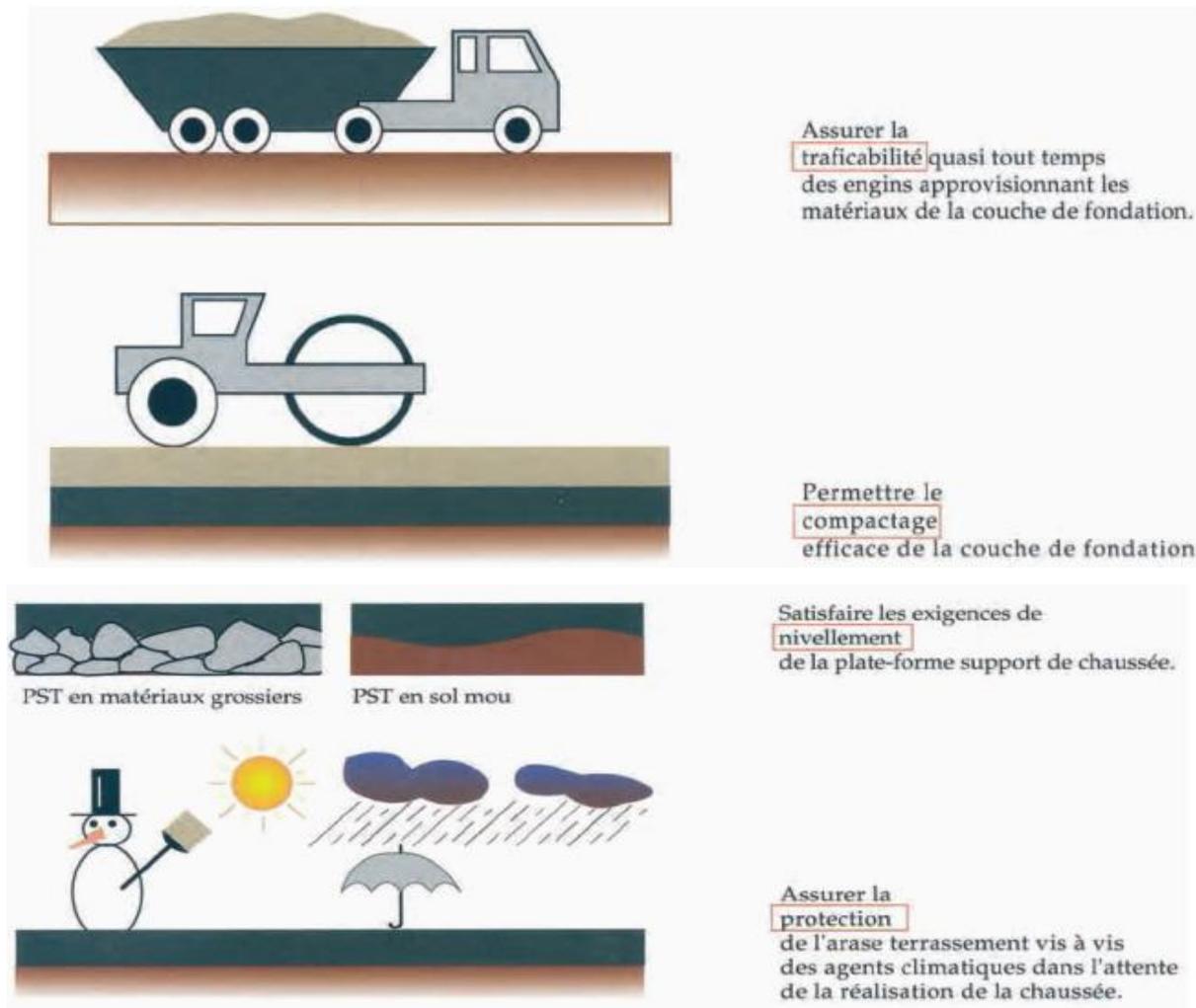


Figure 1.5. Fonctions à court terme de la couche de forme

Guide de Terrassement Routier GTR, Fascicule 1, Juillet 2000, 2^{ème} Edition. Page 51.

Fonctions à long terme

- Homogénéiser la portance du sol en permettant ainsi de concevoir des chaussées d'épaisseur constante ;
- Assurer le maintien dans le temps en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau ;
- Améliorer la portance de la plate-forme afin d'optimiser le coût de l'ensemble "couche de forme structure de chaussée" ;
- Assurer la protection thermique des sols supports ;

- Contribuer au drainage de la chaussée

1.2 LES SABLES GRANITIQUES 0/5 EN TECHNIQUE ROUTIÈRE

1.2.1 Description sommaire du granite

Le granite est une roche plutonique magmatique à texture grenue dure et résistante (Zomahoun, 2021). La norme française définit le concassé granitique comme étant un ensemble de grains minéraux de dimensions comprise entre 0 mm et 80 mm. Les concassés granitiques sont exploités dans la construction des infrastructures routières dans le cadre des revêtements superficiels (bicouche ou tricouche) et pour la fabrication des bétons d'ouvrages d'art. De façon générale, on exploite les concassés granitiques de différentes classes granulaires, dosés à différent pourcentage de manière à se conformer aux spécificités courantes.

Les minéraux constitutifs des granites sont principalement du quartz, des micas (biotite ou muscovite), des feldspaths potassiques (orthoses) et des plagioclases. C'est un matériau résistant très utilisé en construction, dallage, décoration, sculpture. Au Bénin on rencontre les affleurements de granites un peu partout à partir du centre du Pays vers la partie septentrionale. Les granites affleurent principalement de trois manières :

- ✓ En affleurements plats de quelques mètres de hauteur et pouvant s'étendre sur plusieurs hectares ;
- ✓ En coupoles très vastes pouvant atteindre 30 à 40 mètres de hauteurs et même plus dans le nord entre Dori et Djibo et un diamètre parfois supérieur à 500mm ; ces gisements sont facilement exploités en carrière ;
- ✓ En affleurement constitués d'une accumulation chaotique de grosses boules qui résultent de la fragmentation de la roche par l'action des agents météoriques.

1.2.1.1 Composition chimique et minéralogique des granites

Composition chimique : La composition chimique moyenne du granite est : 74,5 % de SiO₂, 14 % de Al₂O₃, 9,5 % de (Na₂O, K₂O), 2 % d'oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca). Le granite est donc

une roche acide (riche en silice) et dense avec une densité moyenne égale à 2,7. (François Michel.,2005)

Composition minéralogique : En observant un fragment de granite à l'œil nu on peut voir :

- ✓ des taches grises transparentes qui sont les cristaux de quartz (silice pure) qui forme plus des deux tiers du granite ;
- ✓ des taches noires formées de petites paillettes brillantes (quelques granites ont également des paillettes de couleurs blanches) qui sont les cristaux de mica (silicate d'alumine) ;
- ✓ des taches blanchâtres ou roses qui forment les cristaux de feldspath (silicate d'alumine). La structure du granite est donc grenue.

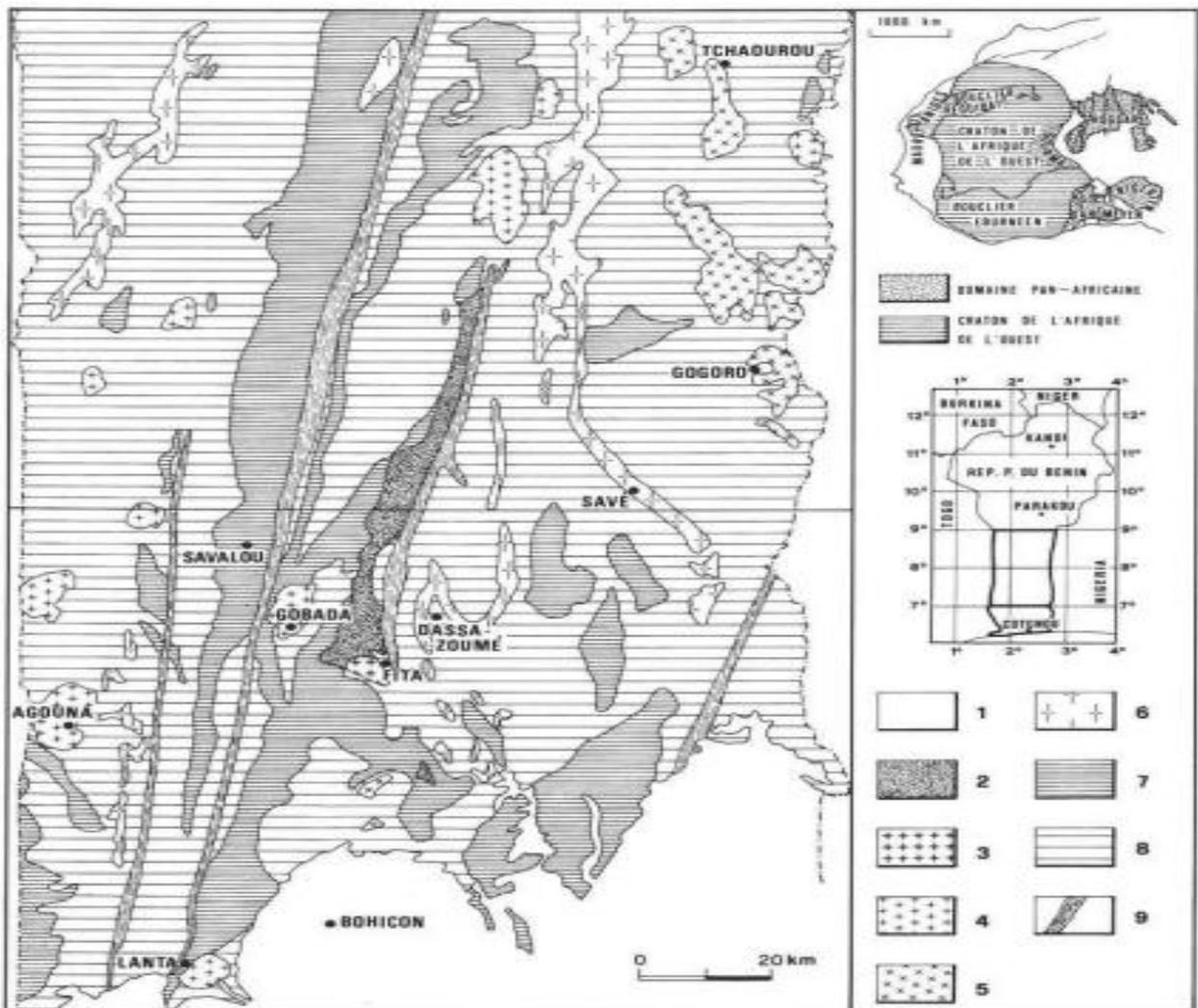


Figure 1.6 : Carte géographique schématique du socle cristallin du Bénin

Source : https://rruff.info/rdsmi/v43/RDSMI43_477.pdf

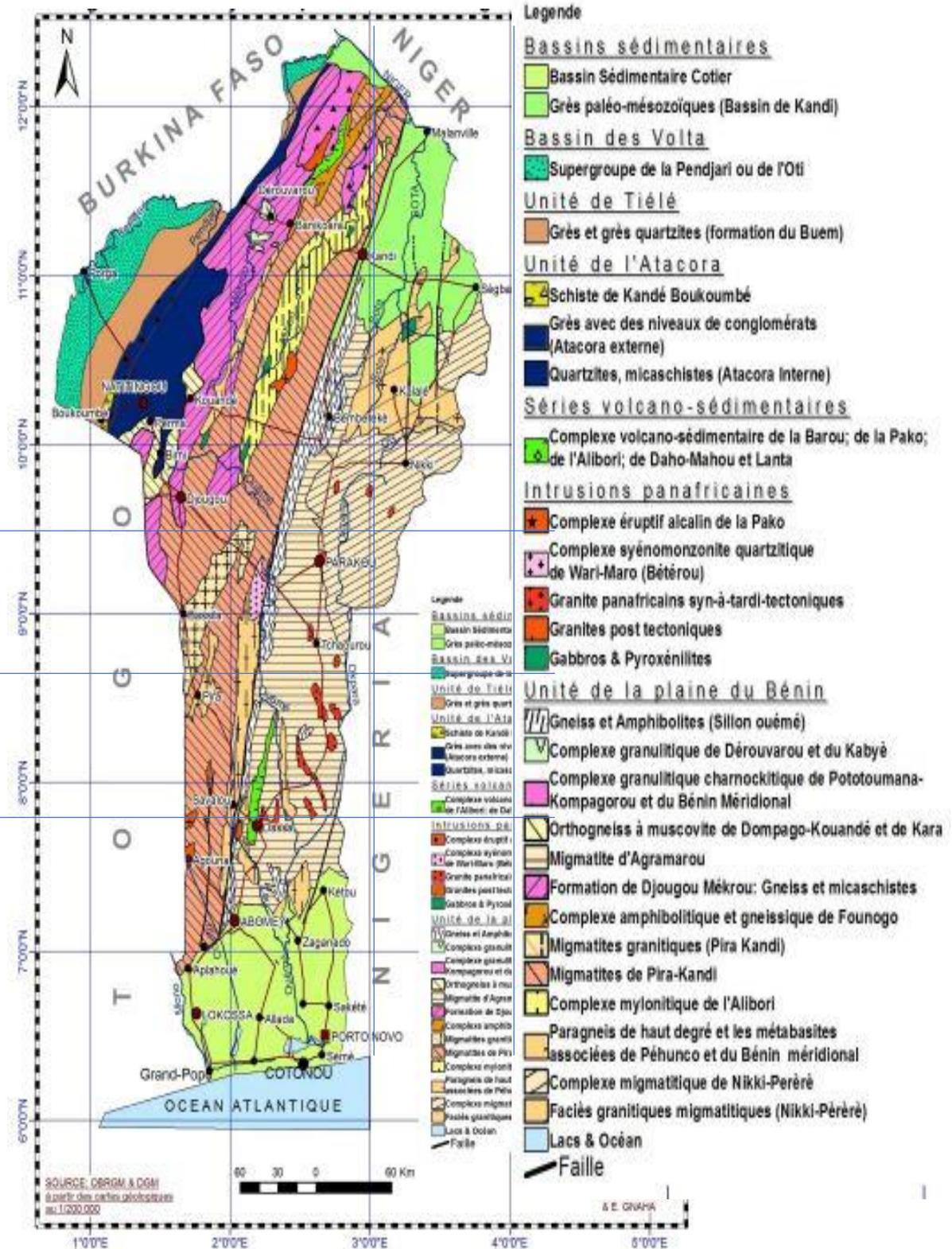


Figure 1.7 : Carte géologique du Bénin

Source : <https://image.app.goo.gl/GonGfbhEMhebkspj9>

1.2.1.2 Production du granite concassé (Classe 0/5)

Après l'étape de dynamitage des granites, la production des granites concassés s'effectue dans une usine qui peut être localisée sur le site même de la carrière ou bien totalement délocalisée du site d'exploitation. La production des matériaux suit un processus bien défini et spécifique. Le processus de transformation du tout-venant se déroule suivant trois étapes qui sont :

- étape primaire ;
- étape secondaire ;
- étape tertiaire.

Les différentes étapes de transformation sont décrites comme suite :

✓ **Etape primaire**

Tout d'abord le tout-venant en provenance soit de la zone d'exploitation (abattage) ou soit de la zone de réserve, est déversé dans la trémie qui est dotée d'une plaque coulissante. Cette plaque va occasionner un mouvement de va et vient entraînant le déplacement des matériaux (tout-venant) vers le concasseur primaire qui les réduit en une granulométrie en fonction du réglage du concasseur. Ce qui nous donne une dimension des matériaux concassés comprise entre 0 et 200 μmm . Ceux-ci sont évacués vers le crible vibrant (CVB). Le criblage s'opère au sein de ce crible et on obtient deux types de granulométrie :

- les granulats 0/31,5 qui peuvent aller vers un autre crible vibrant pas le biais d'un convoyeur secondaire pour donner les granulats **0/5**, **5/15**, **15/22** et **5/25** qui seront stockés pour la vente les cas contraires ils sont directement stockés en fonction de sa demande sur le marché ;
- les granulats **50/70** qui vont directement dans une trémie au marteau.

✓ **Etape secondaire**

Les refus vont aller au deuxième concasseur. Après broyage ils sont transportés par une bande transporteuse jusqu'au convoyeur primaire pour se mélanger au tout venant en direction du crible vibrant. On obtiendra :

- les granulats **50/70** qui sont acheminés dans une trémie au marteau où ils sont stockés ;
- les granulats **0/31,5**.

✓ **Etape tertiaire**

Le domaine tertiaire fonctionne grâce à son alimentation par les trémies en granulats 50/70. Ceux-ci sont broyés par le marteau concasseur, leur donne un type de granulométrie, le 0/30. Ces granulats de 0/30 sont évacués dans le crible CVB, on obtient les produits suivants :

- le **0/5** ; le **5/15** ; le **15/25** et le **5/25** qui sont tous des granulométries (produits) stockés pour les commandes,
- le **25/30**, sont les granulométries qui retournent aux trémies.



***Photo 1.1 : Image montrant le concasseur, la trémie et le sable concassé 0/5
Carrière de TAN (ZAGNANADO) : Exploitée par l'Entreprise OFMAS***

1.2.2 Formation des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une désagrégation ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport (fluvial ou éolien) qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques. Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation.

Les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressifs vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz qui devient de plus en plus abondant au fur et à mesure que la taille des grains décroît. La fraction comprise entre 0,2 mm et 0,5 mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%.

Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature. La densité massique du sable sec varie, selon sa granulométrie et sa composition, de 1,7 à 1,9 Kg par litre (1800 Kg en moyenne par m³).

Selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par une multitude d'aspects : granulométrie, teneur en eau, nature et caractéristiques des fines, composition chimique, et minéralogique, forme des grains, dureté, ...etc.

Les enquêtes menées révèlent que le sable silteux, l'un des matériaux utilisés en couche de fondation de nombreuses chaussées, présente une bonne performance surtout lorsqu'il est amélioré avec du ciment à faible dose. Longuement exploité sur les sites de Djrègbé et de Ouidah, et en cours d'exploitation actuellement, ce précieux matériau s'épuise progressivement. Selon les investigations menées sur les sites d'extraction et les informations recueillies à la Direction Générale des Mines (DG Mines) et à l'OBRGM (Office Béninois de Recherches Géologiques et Minières), les carrières de sable silteux disparaîtront d'ici quelques années.

Outre l'existence sporadique du sable silteux, la terre de barre est abondamment disponible sur le continental terminal. Les quelques poches de graveleux latéritiques sont complètement épuisées. Les sables lagunaires et fluviaux également disponibles dans les cours d'eau sont mentionnés.

1.2.3 Ressources en terre de barre dans le Sud-Bénin

Définition : La terre de barre est définie comme étant une formation plus ou moins meuble, de couleur rouge à brun rouge ; humide, elle est légèrement "collante". Elle ne contient jamais de débris de roches ou de galets de diamètre supérieur à 1 cm. Lorsque la formation est faiblement indurée, elle présente des fentes de dessiccation. Selon les études de Slansky, la terre de barre est Développée sur les six plateaux du sud Bénin (plateau d'Aplahoué, d'Allada, d'Abomey, de Zangnanado, de Sakété et de Kétou).

Par ailleurs, le Professeur Mohamed GIBIGAYÉ de l'Université d'ABOMEY CALAVI au BÉNIN, dans sa communication du 19 Avril 2024 à l'occasion de la deuxième édition de "SDP TALK" à COTONOU sur le thème << ***Mise en lumière des matériaux locaux dans la construction durable au BENIN : Utilisation innovante du sable argileux (Terre de barre) pour des infrastructures modernes, économiquement adaptées et climatiquement résilientes***>>, a fait savoir que le BÉNIN possède et le sait depuis 1962 sept plateaux qui regorgent d'énormes quantités de terre de barre. Il s'agit donc des plateaux d'Abomey, Allada, Zangnanado, Kétou, Aplahoué, Sakété et la bande de la Lama. Dans sa présentation, il a fait savoir que seule la terre de barre du plateau de Zangnanado peut être utilisée à l'état naturel par les Ingénieurs et Architectes. Celle des autres plateaux nécessite une reconstruction de sa composition granulaire avant usage.

La terre de barre se localise entre 60 20' et 70 20' de latitude Nord puis les méridiens 10 40' de longitude Est et couvre une superficie d'environ 10.500 km².

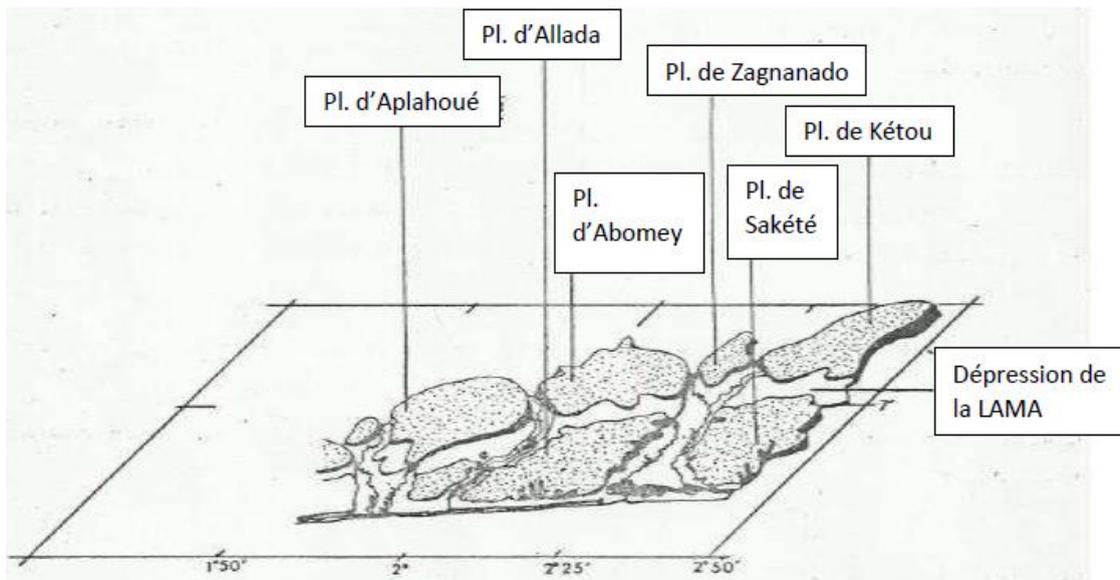


Figure 1.8 : Schéma morphologique de la répartition des unités géographiques (in M. SLANSKY - 1959)

Composition : La terre de barre du sud Bénin décrite par WILLAIME et VOLKOFF en 1966 présentait les caractéristiques physiques et chimiques suivantes : 15,3% d'argile ; 5,4% de limon ; 77,3% de sable et 0,05% d'Azote total ; la teneur en matières organiques était de 2,64%.

L'analyse minéralogique a permis de distinguer deux catégories de matériaux par leur densité :

- Les minéraux légers : constitués essentiellement de quartz et quelques paillettes de micas ;
- Les minéraux lourds : constitués de zircon, tourmaline, rutile, disthène, épidote (clinozoïte, pistachite, staurotide et sphène) (tableau 1-4).

1.3 GÉNÉRALITÉS SUR LA STABILISATION DES SOLS EN GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE

Vu la rareté des matériaux de l'assise de chaussée notamment dans la partie méridionale du Bénin en sa zone Sud, il devient nécessaire de composer un matériau dont les caractéristiques pourront répondre aux exigences des matériaux de corps de chaussée.

Pour cela, on procèdera à la méthode de stabilisation. Le guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux recommande essentiellement deux méthodes. Il s'agit de :

- La stabilisation chimique ;
- La stabilisation mécanique.

1.3.1 Définition de la Stabilisation chimique et liant utilisés

La stabilisation chimique est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et d'un liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier.

Selon l'utilisation prévue ou en fonction du type de sol à stabiliser, il existe plusieurs types de traitements des sols qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé. Généralement, on peut exclusivement les traitements suivants :

- ❖ Stabilisation à la chaux : Il s'agit de l'adjonction de chaux vive aux matériaux d'infrastructure qui modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux. La chaux est obtenue par cuisson de carbonate de calcium pur (CaCO_3). Elle se présente sous deux formes : Sous forme de chaux vive et Sous forme hydratée
- ❖ Le mélange sol-chaux : Il permet de diminuer la teneur en eau, d'atteindre une densité optimum lors du compactage, d'augmenter ainsi la résistance mécanique du sol traité ; une diminution de l'indice de plasticité IP ; une augmentation de l'indice porteur après 4 jours d'immersion ; un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor (NF EN 459-1 et NF P 98-101).
- ❖ Stabilisation au ciment : Il s'agit de l'adjonction de ciment à un sol en place ou à un matériau d'apport afin d'obtenir une meilleure portance, diminution de la sensibilité à l'eau. Les avantages du traitement au ciment sont l'augmentation de la résistance du sol

et de la durabilité ; la formation d'une couche dure, cohérente et imperméable (NF EN 197-1).

- ❖ Traitement aux pouzzolanes : Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux résultants des émissions explosives de laves lors des phénomènes volcaniques alors que les pouzzolanes artificielles ne sont que des résidus de combustion du charbon produits dans les industries et/ou centrales d'incinération.
- ❖ Traitement aux liants hydrocarbonés : Les liants hydrocarbonés au contact de particules solides telles que les granulats développent des forces d'adhésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances aux déformations en traction, compression et cisaillement. Les principaux liants hydrocarbonés sont : le bitume (un produit de distillation des huiles minérales) et le goudron (distillation du charbon).
- ❖ Traitement aux produits chimiques : Certains produits chimiques à base d'hydroxyde de calcium, de polymères sont utilisés en construction routière pour améliorer la capacité portante des sols.
- ❖ Traitement mixte : Il consiste à améliorer la qualité d'un sol par combinaison de deux ou plusieurs stabilisants en vue d'atteindre les performances mécaniques souhaitées. Il existe plusieurs combinaisons mais la plus utilisée est celle de la chaux-ciment.

Les deux types de stabilisation chimique les plus courants sont : celle à la chaux et au ciment.

1.3.2 Définition de la Stabilisation Mécanique et matériaux utilisés.

La stabilisation mécanique des sols est aussi une technique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. Elle porte sur l'amélioration de la composition granulométrique d'un sol en place ou d'un matériau d'apport par adjonction en petite quantité d'une fraction de matériaux pierreux, afin d'améliorer les possibilités de compactage. L'une des méthodes la plus courante est la litho stabilisation.

- ❖ **La litho Stabilisation** : Elle vise par exemple l'amélioration de la granularité de la grave latéritique naturelle par adjonction d'un certain pourcentage de granite concassé ou de sable pour amaigrir un matériau argileux afin de lui donner du

squelette. Ceci permettra d'obtenir un mélange présentant de meilleures performances géotechniques (essentiellement la portance et la réduction de l'indice de plasticité).

1.3.3 Choix des stabilisants

Quelques fois, plusieurs stabilisants donnent de bons résultats, mais l'un peut être mieux adapté que les autres. Quelques facteurs influençant le choix (sélection) d'un stabilisant sont :

- Exigences techniques (performances souhaitées) ;
- Conditions du site (mise en œuvre) ;
- Temps ;
- Disponibilité du stabilisant ;
- Economie ;
- Résultats des tests au laboratoire (type du sol)

1.3.4 Objectif et avantages des stabilisations.

Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme. Il a deux raisons d'être :

- soit pour améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre la progression du chantier ou de sols à réutiliser en remblai ;
- soit pour réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries pour la circulation de chantier et la mise en œuvre de la fondation.

L'optique du traitement est différente selon le cas :

- dans le premier cas, on cherche un effet rapide et de niveau suffisant pour rendre la circulation des engins et la mise en œuvre possibles, mais sans chercher à obtenir des performances mécaniques élevées par la suite ;

- dans le second cas, on recherche une résistance mécanique pour la plate-forme. Le choix des opérations est alors étudié pour obtenir un matériau relativement noble par rapport au matériau naturel.

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui présente trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques / environnementaux.

Avantages techniques

Le traitement des sols en place, à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, stable et durable, qui possède des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. De plus, grâce à la rigidité du nouveau matériau, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support. Généralement, elle assure un bon comportement par temps chaud. On ne constate ni déformation, ni orniérage, et la structure se comporte bien, vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à sa rigidité et à l'effet de dalle induit. Enfin, cette procédure de traitement, est une technique dont la facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation, reste des plus faciles.

Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place, est un facteur d'économie important, puisqu'il réduit au minimum les déblais, issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût des différents transports. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, c'est une technique très économique, notamment par sa durée, plus courte, par rapport à une solution avec décaissement.

Avantages écologiques / environnementaux

Les avantages écologiques et environnementaux des divers traitements sont essentiellement :

- La préservation des ressources naturelles non renouvelables (carrières, ballastières) : utilisation des matériaux en place,
- Une importante économie d'énergie globale : réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge (donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains) et de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier,
- Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère.

En résumé, Il existe plusieurs techniques de stabilisation en géotechnique routière. Compte tenu de la disponibilité des stabilisants, le présent travail se limite à l'amélioration du sol au ciment portland, à la chaux vive et à la latérite.

La connaissance de ces paramètres permet de concevoir une chaussée rigide. Les matériaux utilisés font l'objet d'une étude au laboratoire afin de déterminer leurs caractéristiques.

Dans le chapitre qui va suivre, nous allons aborder les études menées au laboratoire dans le cadre de l'amélioration de la terre de barre.

1.4 Bilan des travaux antérieurs sur l'utilisation de la méthode de litho stabilisation en assises de chaussées

Plusieurs études au Bénin et ailleurs ont porté sur le problème de matériaux routiers de la région côtière. Au nombre de celles-ci nous pouvons citer :

- ✚ Les travaux d'AFOUDA et HOUNGUEVOU, réalisés en 2005 et intitulés "Contribution aux possibilités de l'utilisation des sables de la région côtière de la République du BENIN en technique routière", qui ont abouti à la conclusion selon laquelle 50% de terre de barre + 20% de sable lagunaire + 30% de concassés présente les caractéristiques d'un matériau pouvant être utilisé en couche de base pour trafic élevé. L'indice CBR obtenu était 94.

- ✚ Les travaux de JIKOLUM NGANGMIAN Emmanuel, réalisé 2011, et portant sur utilisation de la technique de la litho stabilisation en assise de chaussée : cas des travaux de renforcement du tronçon Ouaga-Po – frontière du Ghana.
- ✚ Les travaux de Mahamadou Souley Issiakou, Nadia Saiyouri, Yannick Anguy, Cécile Gaborieau, et Richard Fabre, réalisé en 2015, et portant sur « Etude des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger : méthode d'amélioration », qui ont montré que l'ajout de 10% de nodules latéritiques concassés de classe granulaire 0/5 augmentent la portance du sol latéritique étudié, diminue le gonflement du matériau non traité ayant un taux d'argile naturellement élevé.
- ✚ Les travaux de TANKPINOU Kiki Y., GBAGUIDI V. S., et ZEVOUNOU C., réalisés en 2013 et intitulés « Mise au point pour assises de chaussées de matériaux élaborés (sable silteux et concassés) » qui ont montré qu'un mélange de 60% de sable silteux de Djèrègbé et de 40% de concassé de granite de Dan a donné un CBR de 70 contre 3 pour le sable silteux naturel. Il peut être utilisé en couche de fondation pour tout type de trafic.
- ✚ Les travaux de ZANNOU Charles, réalisés en 2013 et intitulés « Etude des possibilités d'utilisation des sables propres en construction routière : vers l'élaboration de nouveaux matériaux à base de ces sables » qui ont montré que le mélange de 50% de terre de barre + 50% de sable tous deux de Bonou peut être utilisé en couche de fondation des chaussées revêtues (CBR à 95% OPM =28) et en couche de base pour des trafics allant de T1 à T4 avec un dosage en ciment de 4%.
- ✚ Les travaux de AMOUSSOU Prosper, réalisés en 2015 et intitulés « Problématique des matériaux d'emprunts au sud du Bénin : approche de solutions » qui ont prouvé que le matériau recyclé de la chaussée dégradée du tronçon Comé-Lokossa-Dogbo est utilisable en couche de fondation, et en couche de base en l'améliorant à 3% et 4% de ciment. Le mélange 48% de terre de barre et 52% de sable lagunaire a donné de meilleurs résultats pour être utilisé en couche de fondation et peut toutefois être amélioré aux liants pour son utilisation en couche de base.

- ✚ Les travaux de KENFACK Thomas Molière, réalisés en 2017 et intitulés « Influence de la classe granulaire des concassés de granite sur la mise en œuvre de la technique de la litho stabilisation en vue d'assurer une meilleure durabilité des couches de base » qui ont montré que le mélange constitué de 20% de concassé de granite 5/25 + 80% graveleux latéritique peut être utilisé en assises de chaussée car offrant une meilleure portance au CBR à 95% de l'OPM.

- ✚ Les travaux de KOTCHÉ Babatundé Christel, réalisés en 2021 et intitulés « Formulation d'un matériau de substitution au silteux en couche de forme à base du sol en place : Cas des voiries urbaines dans le cadre du projet asphaltage à PORTO-NOVO », qui ont abouti à la conclusion selon laquelle 70% de terre de barre + 30% de sable lagunaire présente les caractéristiques d'un matériau pouvant être utilisé aisément en couche de Forme. L'indice portant CBR obtenu à 95% de l'OPM est 38.

- ✚ Les travaux de thèse du Dr Serge Kpomagbé DOSSOU réalisé et soutenu en Février 2023 sur le thème : « Valorisation en technique routière de la grave latéritique de Avlamè en République du Bénin : Estimation expérimentale du module sécant ».

Ces différents travaux prouvent que la terre de barre est utilisable en couches de chaussée à condition d'être litho stabilisée avec un autre matériau granulaire et si possible traitée aux liants hydrauliques. Mais toutes les régions où l'on retrouve ce matériau n'ont pas encore été explorées.

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU PROJET, CONTEXTE ET JUSTIFICATION, MATÉRIAUX D'ÉTUDES, MATÉRIELS ET MÉTHODES

OBJECTIF DE LA PARTIE

L'objectif de cette partie est de décrire le contexte et la justification du projet (zone géographique, etc..) au cours duquel nos études ont été faites, de présenter le bureau d'études, les matériaux étudiés, le matériel d'essai ainsi que la méthode d'études (les Essais réalisés).

2.1 PRÉSENTATION DU PROJET

2.1.1 Contexte et justification du projet

Le Gouvernement du Bénin ambitionne d'améliorer le bien-être de tous les béninois et de préserver l'environnement au plan national, avec comme vision un développement inclusif et durable articulé autour de villes résilientes et sûres. L'ambition est de parvenir à un aménagement équilibré du territoire, à l'amélioration progressive mais effective du cadre de vie des populations, dans la promotion d'une gestion rationnelle et durable des ressources naturelles et forestières. Pour y parvenir, le Ministère adopte une approche intégrée et opérationnelle du secteur, approche qui est donc basée sur les synergies indispensables à établir entre le développement urbain, l'habitat et l'environnement, sur la rationalisation et la mise en cohérence des programmes et des interventions de l'État, et sur le partenariat avec les communes.

2.1.2 Objectifs du projet

L'objectif du projet d'aménagement des voiries primaires, secondaires et tertiaires – Projet Asphaltage – est d'augmenter et de moderniser le stock de voiries urbaines à Cotonou, Porto-Novo, Parakou, Abomey-Calavi, Sème-Podji, Abomey, Bohicon, Natitingou et Lokossa. A ces villes, se sont ajoutées les villes de Kandi et Djougou pour cette deuxième phase B1.

Les résultats attendus de ce projet sont l'aménagement et la réhabilitation de 600 kilomètres de voiries urbaines primaire, secondaire et tertiaire : Cotonou 225 kms, Porto-Novo 85 kms, Parakou 70 kms, et 30 à 35 km dans chacune des autres communes.

Ces interventions permettront d'atteindre les résultats de développement suivants :

- l'amélioration des conditions de circulation dans les villes du projet et donc le développement du transport urbain aussi bien en termes de mobilité des personnes que de logistique urbaine,
- l'amélioration de l'accès des ménages aux équipements sociocommunautaires et aux services d'assainissement pluvial, ce qui permettra de pallier aux maladies hydriques dont le paludisme,

- la rénovation des principales zones d'habitats et d'activités dans les villes concernées,
- la réduction des niveaux de pollution et de nuisances dans ces principaux centres urbains et la contribution à la propreté des rues,

- la dynamisation des économies locales et l'accroissement des ressources financières des villes bénéficiaires par, entre autres, la diversification et l'amélioration du recouvrement de la fiscalité directe locale : amélioration du rendement de la TFU, la TPU (élargissement de l'assiette, actualisation des bases/valeurs), extension du champ d'application de la fiscalité directe locale.

Pour les communes, il s'agit d'une opportunité sans pareil à savoir l'accès rapide à des ressources durables pour régler dans un délai raccourci le plus important problème d'investissement urbain : la voirie urbaine et l'assainissement. Les dynamiques économiques ainsi créées contribueront à la génération d'activités induites (accroissement du niveau d'activités du secteur marchand) avec des besoins d'investissement induits, notamment pour valoriser/renforcer les autres infrastructures de soutien aux activités économiques locales : stationnement urbain et parkings, occupation règlementée du domaine public, transport public urbain, espaces publicitaires, marchés et gares routières, etc.

2.1.3 Description sommaire de la zone de projet

📍 Présentation de la ville du Projet – Porto-Novo

Situé au sud du Bénin à 30 km de Cotonou, la ville de Porto-Novo est localisée entre 6°30 de latitude nord et 3°30 de longitude Est. Elle est limitée :

- ❖ Au nord par les communes d'Akpro-Missérété, d'Avrankou et d'Adjarra ;
- ❖ Au Sud par la commune de Sèmè-kpodji ;
- ❖ À l'Est par la commune d'Adjarra ;
- ❖ À l'Ouest par la commune des Aguégoué.

La ville de Porto-Novo couvre une superficie de 52 km² soit 0,05% du territoire nationale. Selon la tradition orale, les origines de Porto-Novo remontent vers la fin du 17^{ième} siècle autour du mythe des trois chasseurs yoruba venus du Nigéria. Porto-Novo a gardé, malgré les aléas de l'histoire et l'ascension de la ville de Cotonou, son statut de « Capitale du Bénin ». La ville a été cependant dépouillée de ses attributs de capitale vers les années 60 et 70 avec le transfert de la Présidence et des Ministères à Cotonou. Avec l'avènement du Renouveau Démocratique en 1990, le statut de capitale du Bénin a été confirmé à nouveau et la ville connaît un nouvel essor avec la mise en œuvre

d'un programme spécial de réhabilitation dont le principal objectif est de lui redonner ses attributs de Capitale du Bénin.

La ville de Porto-Novo abrite tous les services déconcentrés de l'administration publique ainsi que des Directions Départementales des principaux ministères. Sa proximité de la frontière avec le Nigéria en fait désormais une des plaques tournantes du commerce informel de la sous-région.

Porto-Novo compte 264 320 (Deux cent soixante-quatre mil trois cent vingt) habitants selon les résultats du RGPH 4 (2013) dont 47,67% d'hommes et 52,32% de femmes. Elle dispose d'un réseau routier mixte composé de quelques routes bitumées et pavées de bonne qualité et d'une majorité de rues non bitumées plus ou moins praticables selon l'importance des pluies. Malgré son importance dans le tissu économique et social, elle est sujette à de nombreux problèmes d'assainissement et son réseau routier reste encore peu fourni.

2.1.4 Présentation des arrondissements concernés

La ville de Porto-Novo compte cinq bureaux d'arrondissement. Il s'agit des Arrondissement 1 installé à Houèzoumè, Arrondissement 2 installé à Attakê, Arrondissement 3 installé à Djassin, Arrondissement 4 installé à Houinmè et Arrondissement 5 installé à Ouando. Les arrondissements sont administrés par les chefs d'Arrondissements qui ont sous leur tutelle les chefs des quartiers.

Le tableau 1 présente les différents quartiers de ville qui composent ces arrondissements. Les caractéristiques administratives et démographiques de chacun des 5 arrondissements de Porto-Novo ciblés se présentent comme suit :

Tableau 1. Quartiers de ville des cinq arrondissements

Arrondissements	Quartiers de ville	Total quartier	Population
1er	Accron Gogankomè, Adjégounlè, Adomè, Ahountinkomey, Akpassa Odo Oba, Avassa, Odo Oba, Avassa Bagoro Agokomè, Ayétoro, Ayimlonfidé, Agansakomè Dota Attingbansa, Dégué-Komey, Flékomey-Ilefié, Ganto, Gbassou Bodokomè, Gbèkon, Guévié, Zinkomey, Hondji Honnon Filla, Houegbo, Hlinkomey, Houèzoumè, Houéyogbé Gbédji, Idi Araba, Kpota Sandodo, Lokossa, Oganla, Gare Est, Sadognon Adjégounlè, Sadognon Woussa, Sagbo Kossoukodé, Tofeinkomè Sohomè, Togo Adankomè, Vèkpa.	29	33 161

2ème	Agbokou I, Agbokou II, Agbokou III, Attakè I, Attakè II, Djègan Daho, Gbèzounkpa, Kandévié III, Koutongbé, Lissèssa, Tchinvié Sèdjèko Hinkoudé, Zounkpa	13	52 571
3ème	Adjina Nord, Adjina Sud, Djassin Daho, Djassin Zounmè, Ouenlinda I, Foun foun, Avakpa Kpodji, Ouenlinda II, Avakpa Tokpa, Foun foun Djaguidi, Foun foun Gbègo, Foun foun Sodji, Foun foun Tokpa, Hassou Aguè, Oganla Atakpamè, Oganla Nord, Oganla Gare, Sud, Oganla Poste, Oganla Sokè, Zèbou-Aga, Zèbou-Ahouangbo, Zèbou-Itatigri, ZèbouMassè.	22	33 535
4ème	Anavié, Château d'eau, Djaguidi, Djegan, Kpèvi, Dodji, Ganto, Gbèdjromédé, Gbodjè, Guévié, Hlongou, Hounsa, Hounsouko, Kandévié-Missogbé, Kandévié-Owodé.	14	63 306
5ème	Akonaboè, Djilado, Dowa, Houinvié, Louho, Ouando, Tokpa I, Tokpa II.	08	81 747

2.1.5 Situation géomorphologique et pédologique de la zone de projet

La ville de Porto-Novo est caractérisée par trois types de sols à savoir :

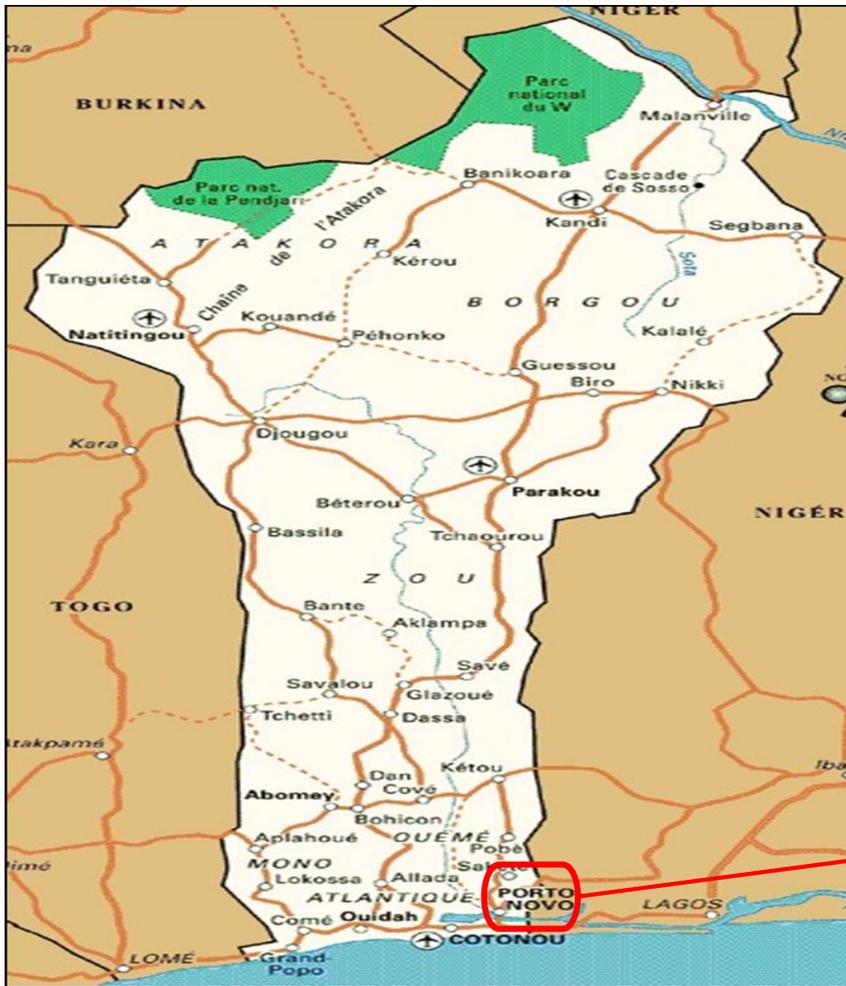
- ⊗ les sols des plateaux : composés de sols ferralitiques appauvris sur sédiment meuble, et de sols ferralitiques hydromorphes sur sédiment argileux de couleur rouge et à texture sablo-argileux (terres de barre). Ces sols sont fortement érodés en raison de la pente et de l'écoulement pluvial ;
- ⊗ les sols de bas de pente : sols de coloration brune claire, à texture sableuse et faciles à travailler, ils se situent en bordures des bas-fonds marécageux, soit dans des dépressions. Ces sols résultent du charriage des alluvions des terres des plateaux vers les zones basses ;
- ⊗ les sols hydromorphes argileux, riches en matières organiques, situés dans les zones inondables.

2.1.6 Relief

La ville de Porto-Novo a un relief très peu accidenté. D'une altitude de moins de 60m, le relief présente par endroit des entailles ; ce sont de petites et moyennes dépressions aux pentes très peu marquées.

2.1.7 Situation géographique

L'une des communes qui abrite le gigantesque projet asphaltage est celle de PORTO-NOVO, la capitale administrative et politique du Bénin. La phase B1 du projet asphaltage à PORTO NOVO couvre les quartiers Tokpota, Agbokou, Avakpa-Kpodji, Ouenlinda, Oganla, Catchi, Kandévié, Tchinvié Sedjeko et Hinkoudé.



Situation géographique du
projet Asphaltage Porto-Novo

Figure 2.1 : Situation géographique du projet (Carte du BÉNIN tirée sur Internet)

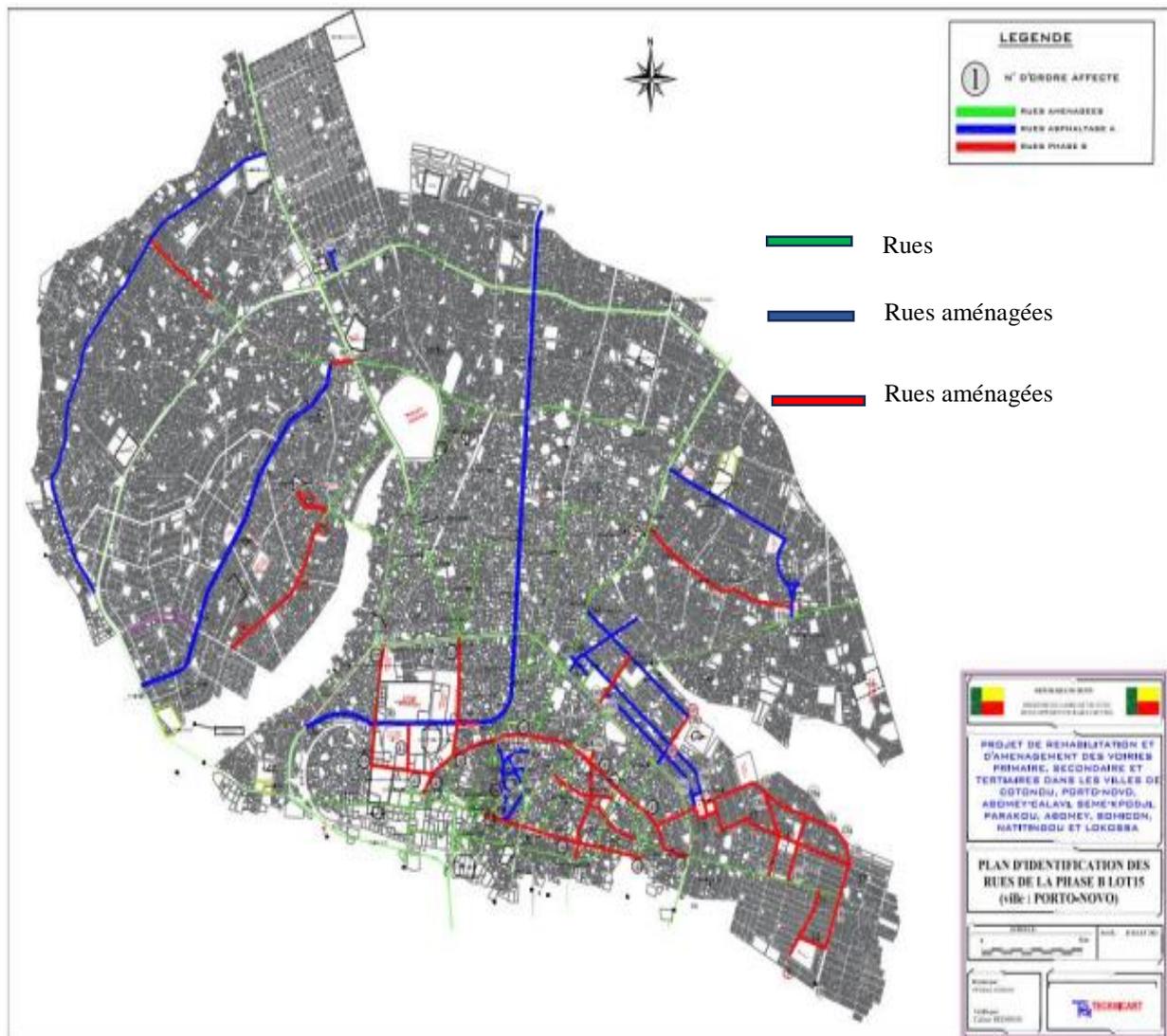


Figure 2.1' : Carte de la ville de **PORTO NOVO** comprenant les **Rues à asphalter**. Rues Phase A en bleu et Rues Phase B1 en rouge. (Plan tiré du PAQ du Projet LOTB1PORTO NOVO)

2.1.7 Présentation des rues du projet

Les rues objet de la présente étude sont les rues du LOT 15-B1. Elles sont répertoriées dans le tableau ci-après :

- 0,578 km de voiries primaires.
- 15,743 km de voiries secondaires.
- 5,277 km de voiries tertiaires.

Tableau 2.1 : Liste des rues du Projet Asphaltage de Porto-Novo lot 15B1

(Tableau tiré du CCTP du marché)

Réf	RUES	Linéaire Topo (km)	Type de revêtement
	RUES PRIMAIRES		
6*	Prolongement de la rue 6 : raccordement de la rue 6 au marché Ouando au niveau de la RNIE1 (Porto-Novo-Missérétié) et dalot 3 de la rue 36 en traversant la rocade en construction.	0.253	Pavé
3b*	La continuité de la chaussée côté droit de la rue 3B au niveau de l'agare de Pobé	0.325	Bitume
	TOTAL RUES PRIMAIRES	0.578	
	RUES PRIMAIRES SECONDAIRES		
7b	Fin pavé carrefour Zinivali-Carrefour Ayélawadjè-Pharmacie Tokpota-Carrefour Juliana-Rocade- Tokpota-Zébe et Bretelle Zounvi-Carrefour SAIZONOU	1.224	Bitume
10A	Boulangerie Tchinvie-Centre de santé Tchinvie-Commissariat Djégan Daho-Marché -Djégan Daho route Médédjounou et prolongement fin pavé Djégan Daho-route de la rocade : Carrefour Saint Pierre et Paul-Centre de santé Tchinvie-Commissariat-Djégan Daho-Marché Djégan Daho	1.273	Bitume
13	Marché Agbokou-CEG Agbokou-Nouveau Marché- Fin Pavé Agbokou-Lokpdji	3.321	Bitume
15	Devanture Mairie (Maison Padonou-Djidjoho) Marché Agbokou-Dravié-Carrefour la liberté-CNPMS-Vers la maison de SAKA embranchement centre de santé Agbokou-Carrefour chez Nafi	2.460	Bitume
38*	Prolongement pénétrante de Dowa jusqu'à la rue 36	0.800	Pavé
41	Rue passant à l'extrémité gauche du nouveau siège de l'Assemblée Nationale	0.362	Bitume
42	Carrefour Catchi-Rails-Carrefour Ecole Urbaine Centre-Carrefour Tribunal-Carrefour Médiateur de la république	1.351	Bitume
43	Carrefour Tribunal-Carrefour CHDO	0.606	Bitume
44	Rue Carrefour Reconfort-Grand Marché-Ecole Léon Bougine-Palais Toffa Premier	1.616	Pavé
45	Rue Ecole Urbaine Centre-Carrefour Kokoyê-Carrefour Sadognon-place Olory Togbé-Eglise Ste Anne -Poste Agbokou-Boulevard de l'extérieure	2. 7 3	Pavé
	TOTAL RUES SECONDAIRES	15.743	
	RUES TERTIAIRES		
9	Carrefour chez Nafi-IDI-Agbokou	0.641	Bitume

Réf	RUES	Linéaire Topo (km)	Type de revêtement
-----	------	--------------------	--------------------

14	Pénétrante Agbokou-IDI	0.284	Bitume
19G	Kandivié Radio Hokon-CEG Davié-Lycée-Technique Industrielle plus Bretelle radio Hokon-Centre de regroupement d'ordures Kandivié Seriki et Radio Hokon- Recette finances Ouémé : Tronçon Lycée Toffa- Rue 19D	0.647	Pavé
20s	Aménagement réseau routier intérieur Avakpa Tokpa et voie d'accès au centre de Tri Sémi-mécanisé (Projet FICOL) : Tronçon Carrefour CHDO-Rail- Ecole Normale Félicien Nadjo de Porto-Novo.	0.947	Bitume
30b	Carrefour Dégningché-Eglise Catholique les Sts Martyrs de l'Ouganda de Tokpota-EPP Gbénonkpo-Carrefour le Destin-CEG LES COCOTIERS-Carrefour voie garage Saïzonou, Bretelle Pont métallique-Hôtel Palais Oriental-EPP Gbénonkpo : Tronçon Bretelle Pont métallique-Hôtel Palais Oriental-EPP Gbénonkpo	0.365	Pavé
18*	Tronçon de la rue 18 portant raccordement des rues 19b et 19d passant devant les lycées industrielles et commerciales de Porto-Novo	0.300	Pavé
33-1	Dispensaire Attake-Clôture Ecole Attake-Mosquée Attake-PlaceAttake2-Attake1-Lokossa-Attingbassa-Avessan et la bretelle Mosquée Zongo Eglise Séraphin : Tronçon Ecole Attaké-Eglise, Séraphin-Hôtel Capitol-Palais Mito Gogan Tofodji	0.905	Pavé
34 brettelle 1	Aménagement diverses bretelles au niveau des quartiers attake. Iléfiè. Vekpa..Adomey et Lokossa du 1 ^{er} arrondissement : tronçonEPP Vékpa-Iléfiè	0.640	Pavé
34 brettelle 7	Aménagement diverses bretelles au niveau des quartiers attake. Iléfiè. Vekpa..Adomey et Lokossa du 1 ^{er} arrondissement : tronçonrue en béton Vékpa-Mosquée Vékpa-rue 33-1	0.548	Pavé
TOTAL RUES TERTIAIRES		5.277	
TOTAL GLOBAL		21.598	

Le linéaire total de voiries (primaires, secondaires et tertiaires) bitumées et pavées pour le lot 15B1 de la ville de Porto-Novo est de 21,598 km.

La photo ci-dessus présente le listing et le linéaire des rues qui constituent le lot 15-B1.

2.1.8 Profils en travers type

Pour les profils en travers, les rues du projet sont regroupées en deux (02) catégories suivant leurs profils en travers et leurs emprises :

Rues primaires : aménagées en 2x2 voies avec contre allées ou pistes cyclables dans des emprises supérieures à 30 m ;

Rues secondaires : aménagées en 1x2 voies dans des emprises comprises entre 15 et 30 m ;

Rues tertiaires : aménagées en 1x2 voies dans des emprises inférieures à 15 m.

Les chaussées sont bordées par des trottoirs de part et d'autre. Selon la catégorie de la voie, ces trottoirs abritent des dispositifs d'éclairage public, divers réseaux, des haies vertes et des

ouvrages d'assainissement (caniveaux latéraux, ouvrages cadres enterrés, buses, etc.). Il est également prévu des aménagements en pavés décoratifs d'embellissement de cadre de vie des trottoirs aux riverains. (En annexes les plans de ces profils).

Le Maître d'œuvre des travaux est le bureau TECKNICART INGENIEURS CONSEILS que nous allons présenter dans les lignes qui suivent.

2.2 PRÉSENTATION DU BUREAU D'ÉTUDES TECKNICART INGENIEURS CONSEILS

Le projet Asphaltage de Porto-Novo est contrôlé par le bureau d'études TECKNICART INGENIEURS CONSEILS.

2.2.1 Historique

Créé depuis 1998 par un groupe d'ingénieurs, TECKNICART INGENIEURS CONSEILS a commencé ses activités par des assistances techniques et conseils aux propriétaires privés surtout dans le domaine des bâtiments, afin de contribuer à l'amélioration de la qualité technique des constructions. De ce fait, il a réalisé les études techniques et le suivi de plusieurs habitations privés de standing varié : 0 étage à R+7 surtout à Porto-Novo, Cotonou, Abomey-Calavi, Ouidah, Lokossa, Abomey et Parakou.

Aujourd'hui, TECKNICART INGENIEURS CONSEILS a connu une évolution et ses interventions s'étendent hors du Bénin et sur tous les domaines du Génie Civil : les études de faisabilité économiques, socio-environnementales et techniques de routes, les aménagements hydro agricoles, des bâtiments, aux ouvrages d'art en passant par l'aménagement de routes (pavages, pistes) et l'assainissement. Actuellement, TECKNICART INGENIEURS CONSEILS œuvre aussi pour la vulgarisation des constructions en matériaux locaux, en particulier, les constructions en terre de barre stabilisée au ciment de type autobloquant dit "HYDRAFORM", en collaboration avec un technicien formé en Afrique du Sud.

TECKNICART INGENIEURS CONSEILS a une bonne expérience avec les ONG et avec l'AGETUR pour l'étude technique, la surveillance et le contrôle des travaux de bâtiments et VRD.

2.2.2 Organigramme

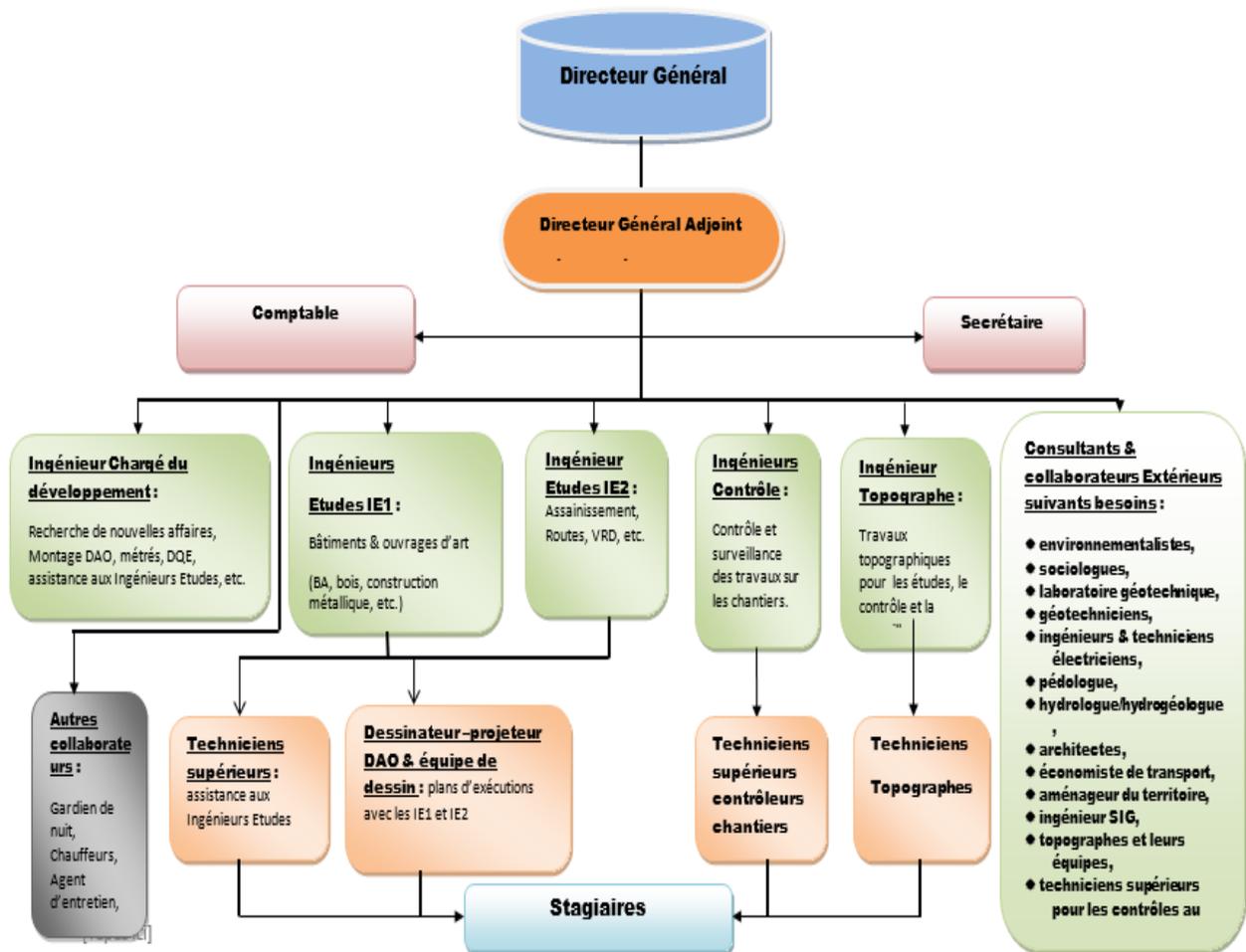


Figure 2.2 : Organigramme du Bureau d'études TECKNICART INGENIEURS CONSEILS

(Organigramme tiré des documents administratifs de TECKNICART)

2.2.3 Situation Géographique du cabinet

Les bureaux de TECKNICART INGENIEURS CONSEILS sont situés à Akpakpa Sodjèatinme Cotonou derrière le stade RENE PLEVEN non loin de l'école primaire publique régionale comme l'indique le plan ci-dessous.

- ❖ Etudes stratégiques, Définition de plans normes et standards ;
- ❖ Expertises immobilières ;
- ❖ Etudes architecturales des travaux ;
- ❖ Supervision de la réalisation et Suivi de la conformité des travaux en génie civil et autres ;
- ❖ Aménagement urbain (voiries et réseaux divers, espaces publics) ;
- ❖ Aménagement hydraulique ;
- ❖ Assistance technique ;
- ❖ Etude de synthèse ;
- ❖ Réception des matériels.

2.2.5 Missions réalisées

Des travaux réalisés par TECKNICART INGENIEURS CONSEILS, nous pouvons citer :

- ❖ ETUDES DE FAISABILITE

Mission d'études de faisabilité économique, d'études socio-Environnementales et d'études technique avec DAO dans le cadre du projet de pavage ou/et de bitumage de rues dans les villes de Porto-Novo et Abomey-Calavi 47000 ml de rues et 4500 ml de collecteurs.

- ❖ AMÉNAGEMENTS HYDRO AGRICOLES

Eudes et réalisation des plans d'exécution des travaux d'aménagement hydro agricole de la vallée du fleuve Niger, périmètres pilotes de la Sota pour le compte du groupement d'Entreprise ENTTP/OMN ;

- ❖ OUVRAGES D'ART ET DIVERS

- Plans d'exécution des travaux de calibrage et d'ouverture de Collecteur AA pour le compte du groupement AVENIR/SOGEI ;
- Plans d'exécution des travaux de calibrage et d'ouverture de Collecteur Wbis et suite W2 pour le compte du groupement DYJESCK/VICO ;
- Surveillance et contrôle de la réhabilitation du stade de Natitingou avec la pose d'une pelouse en gazon synthétique.

- Travaux topographiques, Profils en long, profil en travers et calcul de cubature dans le cadre des travaux d'exécution du collecteur de Yénawa à Cotonou pour le compte de l'entreprise OMN.
- Plan d'exécution des travaux de réalisation du collecteur G à Porto-Novo pour le compte de l'entreprise OMN.
- Comptage de trafic routier à Ekpê pour le compte de l'AGETUR
- Comptage de trafic routier à Savè pour le compte de l'AGETUR
- Etudes de structure pour la réalisation du monument de la place de l'Indépendance à Akonabouè P/N
- Etude technique suivi des travaux pour la réalisation d'une piscine 25x12,5 x4,5 prof A Ouidah.
- Etude technique pour la fondation de l'antenne VSAT du PNUD à Cotonou,

❖ BATIMENTS

- Rénovation et extension de l'EFE MONTAIGNE à Cotonou : Mission d'études techniques et d'élaboration des plans d'exécution pour le compte de l'Entreprise DYJESCK SARL (Plans vérifiés et approuvés par VERITAS) ;
- Construction de la prison civile de Parakou : mission d'études techniques et d'élaboration des plans d'exécution & du DQE pour la phase DAO au profit du Cabinet CHAMPS URBAINS (MOD : AGETUR-SA ; MO MJLDH) ;
- Réfection partielle du bâtiment central du marché Dantokpa : mission d'études techniques, d'élaboration des plans d'exécution et de surveillance & contrôle des travaux (MOD : AGETUR-SA ; MO & Financement : SOGEMA) ;
- Construction d'un bâtiment de type R+5 à usage de Showroom et de dépôt à Lomé : Mission d'études techniques, d'élaborations des plans d'exécution et de surveillance & contrôle des travaux au profit de la ROCHE ;
- Etudes Techniques et Plans d'exécution : Projet de construction d'un bâtiment de type R+1 extensible à R+2 à usage hospitalier sis à Glo Djigbé (Abomey-Calavi) pour le compte de DYJESCK ;
- Etudes techniques et plans d'exécution pour le projet de Réaménagement et d'extension de la boutique La ROCHE à Cotonou.

- Etudes techniques et plans d'exécution pour la construction d'un bâtiment de type R+2 à usage de boutique et de bureau pour le compte de l'Eglise St Jean de Cotonou.
- Etudes techniques et plans d'exécution pour la construction d'un bâtiment de type R+3 au collège St Augustin de Cotonou.
- Etudes de structures pour la construction d'un immeuble Sous-sol + RDC+4+MEZZANINE au profit de COMTEL à Guinkomey – Cotonou.
- Etudes techniques, plan d'exécution et avant métré et élaboration du DQE –terrassement-gros œuvre, VRD pour le Projet de construction de la prison civile d'Abomey Calavi;
- Etudes techniques, plan d'exécution et avant métré et élaboration du DQE –terrassement-gros œuvre, VRD pour le Projet de construction de la cour d'appel d'Abomey le compte de MCA-BENIN;
- Etudes techniques, plan d'exécution et avant métré et élaboration du DQE –terrassement-gros œuvre, VRD pour le Projet de construction de du tribunal de première instance (TPI) d'Abomey-Calavi, le compte de MCA-BENIN;
- Etudes techniques, plan d'exécution et avant métré et élaboration du DQE –terrassement-gros œuvre pour le Projet de construction des cours d'appel de Cotonou et de Parakou le compte de l'AGETUR;
- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DAO pour la construction du marché central de Natitingou pour le compte de l'AGETUR ;
- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DQE pour la construction d'un laboratoire au CEG Kraké-Plage dans la commune de Sèmè-Kpodji pour le compte du CEG.;
- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DAO pour la construction du marché central de Kandi pour le compte de l'AGETUR ;
- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DAO pour la construction partielle du marché central de Djougou pour le compte de l'AGETUR ;
- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DAO pour la construction du marché de Savalou pour le compte de l'AGETUR ;
- Surveillance et contrôle de la construction du marché de Ségbana pour le compte de l'AGETUR ;

- Etudes techniques, plan d'exécution et constitution du DAO pour la construction du marché de Ségbana pour le compte de l'AGETUR ;
- Mission d'actualisation des dossiers de relevés de réfections et de recensement des salles de classe de fortune dans les départements de l'Ouémé et du Plateau pour le compte de l'AGETUR,
- La mission de surveillance et contrôle des travaux de construction des blocs d'hospitalisation des hôpitaux de zone de Ouidah et Abomey-Calavi pour le compte de l'AGETUR,
- Etude technique et surveillance des travaux pour la construction de 2 modules de trois classes avec bureau et magasin plus latrines et deux villas par Enseignants à Zè village AKPALI-KPEVI pour le compte de l'ONG la NOUVELLE ARCHE.
- Surveillance et contrôle des travaux de construction du siège de l'ONG RACINES à Fidjrossè centre-Cotonou.
- Etudes techniques et surveillance des travaux pour le projet de construction du siège de Communitec Bénin R+1 avec installation d'un pylône autoportant de 60m de haut pour COMMUNITEC BENIN.
- Etudes techniques et surveillance des travaux pour le projet de réhabilitation de l'église Notre dames de lourdes de Dangbo avec construction d'un presbytère R+1, assainissement et dallage de la cour.
- Etudes techniques et surveillance des travaux pour le projet de construction de deux modules de trois (3) classes avec bureau et magasin + deux modules de latrines+deux villas pour résidence enseignants, pour le compte de l'ONG la NOUVELLE ARCHE.

❖ ROUTES

- Etudes, Surveillance et contrôle des travaux de bitumage, pavage et assainissement de rues dans la ville de PORTO-NOVO (Projet Asphaltage Phase A & Phase B) ;
- Projet d'Urgence de Gestion Environnementale en Milieu Urbain (PUGEMU) Travaux de calibrage et ouverture de collecteur d'assainissement pluvial à Cotonou (Financement IDA) ;
- Surveillance et contrôle des travaux de pavage et assainissement de rues dans la ville d'Abomey-Calavi (Financement BOAD) ;

- Surveillance et contrôle des travaux de pavage et assainissement de rues dans la ville de Kétou (Financement BOAD) ;
- Etudes de Définition de Plans – Normes-Standards et de Cahiers de prescriptions techniques pour la Construction de points de regroupement des déchets solides ménagers et aménagements sommaires de décharge finale dans les communes de Tchaourou, Savè, Dassa-Zoumé, Bassila, Bohicon, Abomey et Lokossa,
- Surveillance et contrôle des travaux de pavage et assainissement de rues dans la ville de Porto-Novo.
- Etudes techniques pour pavage et assainissement de rues à Cadjèhoun.
- Etudes techniques pour assainissement et pavage du domaine de constructions des villas de type présidentiel pour LA ROCHE. Zone du palais des congrès.
- Etudes techniques pour assainissement et pavage du domaine de constructions des villas de type présidentiel pour LA ROCHE. Zone de champ de tirs.
- Etudes techniques pour assainissement et pavage du domaine de constructions des villas de type présidentiel pour SUD AFFAIRES. Zone de l'aéroport.
- Etude technique DAO pour les travaux d'aménagement en terre de la route Fodégbé à P/N.
- Etude technique DAO pour les travaux d'aménagement et pavage de la voie d'accès du quartier TOKPOTA à P/N.

2.3 LES MATÉRIAUX D'ÉTUDES

2.3.1 Le sable silteux.

☉ Définition et Emploi sur nos rues

De couleur jaunâtre, le sable silteux est un matériau utilisé en construction routière au Benin et au Togo. Il peut être utilisé seul ou amélioré au ciment en couche de forme, en couche de fondation ou en couche de base en fonction des spécifications des cahiers de prescriptions technique. On le retrouve souvent dans les zones de Djèrègbé dans l'ouémé et le long de la côte de l'atlantique (de Godomey jusqu'à Ouidah).



Photo 2.1 : Silteux mis en dépôt.

🌀 Cas de notre projet Asphaltage.

Sur les rues du projet asphaltage que nous avons suivi le sable silteux est le matériau utilisé ici en Couche de forme et en couche de fondation selon les tronçons. Le cahier des clauses Techniques et Particulières donne les spécifications pour son utilisation en couche de forme.

Tableau 2.2 : Spécifications recommandées pour la couche de forme dans le cadre du projet asphaltage lot 15 A.

CRITERES D'ACCEPTABILITE		Spécifications
Matériaux pour couche de forme		
- Indice portant CBR 95% OPM, 4 jours immersion	γ_d (t/m ³)	≥ 30
- Densité sèche à l'OPM		≥ 1,8
- Indice de plasticité ou	IP	≤ 20
Equivalent de sable	E	< 25
- % de fines après compactage	F	≤ 30
- Module de plasticité	F.IP	<500
- Teneur en matières organiques	MO %	<0,5
- Gonflement linéaire	%	< 0,5
- D maxi	mm	2

2.3.2 La terre de barre

🌀 Définition et Emploi sur nos rues

La terre de barre est un matériau qui sert uniquement en terrassement et se limite pour la plupart à la Partie Supérieure des Terrassements (PST) dans le cadre des constructions routières au Bénin. La raison fondamentale de son non utilisation en corps de chaussée, réside à sa faible portance CBR et son indice de plasticité élevé. C'est donc un matériau gonflant qui a une forte capacité d'absorption en eau.

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la terre de barre du Bénin et ont donné les définitions suivantes :

Guilchers (1959) est l'un des premiers à étudier la terre de barre ; il définit la terre de barre qui recouvre le plateau, en arrière du complexe côtier, comme une formation meuble, rouge foncé, de texture argilo-sableuse. La terminologie terre de barre est héritée du portugais « **barral** » qui signifie argile. Les analyses granulométriques, morpho-scopiques et l'étude des minéraux argileux indiquent que la terre de barre est formée d'un matériau hétérométrique, mis en place sous des conditions subaériennes tropicales, avec des consolidations sporadiques. Guilchers conclut que ce matériau forme le couronnement de la série sédimentaire du bassin côtier du Bénin.

Slansky (1959) décrivant les plateaux du bassin sédimentaire qualifie de sol la terre de barre ; ses caractéristiques essentielles sont : mélange meuble de sable et d'argile, de couleur brun rouge. La proportion d'argile ferrugineuse et de sable est très variable. Il pense qu'il s'agit simplement de l'évolution latéritique des niveaux sous-jacents.

Selon **Furon (1964)**, le continental terminal du Dahomey est caractérisé par des formations argilo-sableuse connues sous le nom de « terre de barre ». Elles peuvent atteindre une centaine de mètre de puissance et contenir à la base des niveaux ligneux.

Fauk (1972) attribue, lui le terme de « terre de barre » aux sols rouges développés sur les roches-mères que représente le continental terminal du Bénin.

D'après le rapport national sur la diversité biologique en 1998 (Bénin), la terre de barre est définie comme étant une formation plus ou moins meuble, de couleur rouge à brun rouge ; humide, elle est légèrement « collante ». Elle ne contient jamais de débris de roches ou de galets de diamètre supérieur à 1 cm. Lorsque la formation est faiblement indurée, elle présente des fentes de dessiccation. (M. ADAGBE, 2014).

La terre de barre du sud Bénin décrite par WILLIAME et VOLKOFF en 1966 présente les caractéristiques physiques et chimiques suivantes: 15,3% d'Argile; 5,4% de limon; 77,3% de sable et 0,05% d'Azote total; la teneur en matières organiques est de 2,64%.



Photo 2.2 : Terre de barre retrouvée sur place, côte plateforme et mise en dépôt.

📍 Cas de notre projet Asphaltage.

Sur les rues du projet asphaltage que nous avons suivi, nous avons remarqué la présence de cette terre de barre un peu partout. Elle se fait remarquée déjà à une profondeur de 40 à 70 cm de décaissement. Ces performances n'étant pas concluantes, elle n'est pas souvent utilisée et substituée au

Silteux dans les couches de la chaussée selon la position. Néanmoins il est le matériau essentiel de la Partie Supérieure des Terrassements. La quantité excédante, pas des moindres est évacuée et utilisé pour des travaux de remblais.

L'objectif de notre étude étant l'Utilisation de la Technique de Litho Stabilisation sur la Terre de barre de Sissinkpa (Adjohoun) avec du sable granitique 0/5 de Tan (Zangnanado), en vue de leur exploitation en construction routière, nous contrainst à mieux la connaître. Ci-dessous décrit la méthode adoptée.

2.4 MATÉRIELS MIS EN ŒUVRE POUR L'ÉTUDE

Deux types de matériel sont nécessaire : Le matériel de prélèvement et d'échantillonnage des matériaux et le matériel d'essais (Matériel expérimental).

Le matériel de prélèvement varie suivant la nature des matériaux. Il existe deux types de prélèvement :

- Le prélèvement manuel avec des outils légers tels que la pelle, la pioche et la tarière à main.
- Le prélèvement intact avec les outils mécanisés tels que le carottier guidé par une sondeuse électronique ou mécanique.

Au laboratoire routier, trois termes paraissent nécessaires et indispensables pour rendre un matériau homogène et représentatif avant toute caractérisation. Il s'agit de :

- Sondage ;
- Prélèvement ;
- Echantillonnage

Ces trois termes sont régis par la norme NF EN 932-1. En termes de reconnaissance géotechnique des matériaux sur chaussée, il est nécessaire de réaliser des sondages manuels ou à la pelle mécanique en vue de prélever des matériaux pour différentes études au laboratoire. Ces matériaux, après leur acheminement au laboratoire doivent subir des échantillonnages pour la prise de quantité d'essai. Ainsi, les mots sondage, prélèvement et échantillonnage sont liés et dépendants. L'objectif est de parvenir à obtenir un échantillon représentatif du grand ensemble de matériaux et d'éviter des ségrégations.

Pour la prospection d'un gîte de matériaux, le principe adopté est le maillage du domaine par des sondages bien définis. Ces sondages sont exécutés par des outils manuels à savoir des pioches et pelles afin de déterminer la lithologie du sol. Les prélèvements sont faits sondage par sondage dans des sacs bien étiquetés.

Le matériel d'essais ou matériel expérimental est l'ensemble des matériels pour caractériser un matériau par la méthode expérimentale d'un essai de laboratoire bien défini et régis par une norme en vigueur. Les matériels varient d'un essai à l'autre.

2.5 MÉTHODE D'ÉTUDES

Dans le but de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau amélioré nous avons effectué en laboratoire, les essais ci-après :

Tableau 2.3 : Récapitulatif des essais à réaliser sur la terre de barre

N°	Essais	Normes
1	Analyse Granulométrique par tamisage (AG)	NF P 94-056
2	Limites d'Atterberg (LA)	NF P 94-051
3	Optimum Proctor Modifié (OPM) ;	NF P 94-093
4	Californian Bearing Ratio (CBR) ;	NF P 94-078
5	Valeur au Bleu de Méthylène sur le Sable (VBS)	NF P 94-068
6	Cisaillement direct	

2.4.1 Essais réalisés au laboratoire

🌀 Analyse granulométrie par tamisage (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique est un essai qui permet de déterminer la répartition en poids des grains du matériau suivant leurs dimensions. Le mode opératoire succinct se présente comme suit :

Prélèvement du matériau suivi de son séchage à une teneur en eau raisonnable (Généralement Teneur W% $\leq 3,0$). Il s'ensuit une prise de quantité d'essai suivant l'opération de quartage au cours de laquelle l'opérateur prélève un échantillon représentatif. La prise d'essai est donc pesée, lavée et séchée au bec ou à l'étuve à 105°C. L'échantillon séché est ensuite tamisé à travers une colonne de tamis à mailles carrées, classés dans l'ordre des tamis décroissants de plus grandes mailles aux plus petites mailles sous l'effet des secousses. Le refus de chaque tamis est ensuite pesé de façon cumulée, en commençant par le tamis de plus grand diamètre. Il est nécessaire de déterminer la masse sèche

de l'échantillon d'essai connaissant sa teneur en eau et sa masse humide. Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont traités et reportés sur un diagramme semi logarithmique appelé courbe granulométrique. Par la suite, on procède à l'analyse de ces résultats.

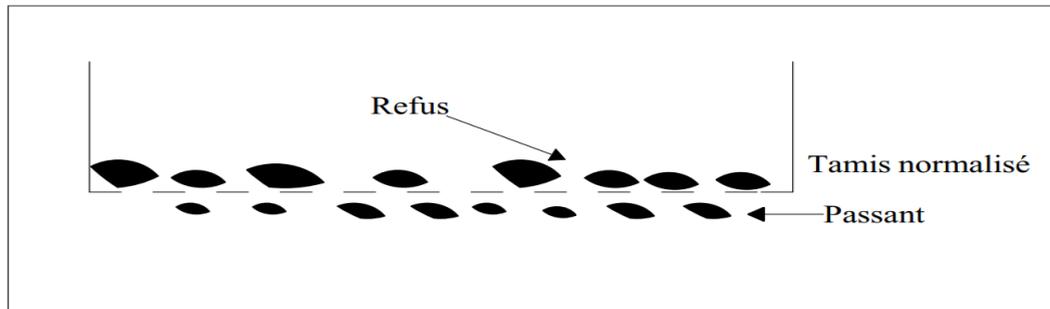


Figure 2.4 : Opération de tamisage

② Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'ATTERBERG sont des paramètres d'identification des sols fins nous permettant de connaître la limite de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité. Ces limites encore appelées limites de consistance caractérisent la consistance des sols.

Suivant la consistance d'un sol remanié, qui est en fonction de la teneur en eau, on distingue quatre (04) états schématisés comme suit :

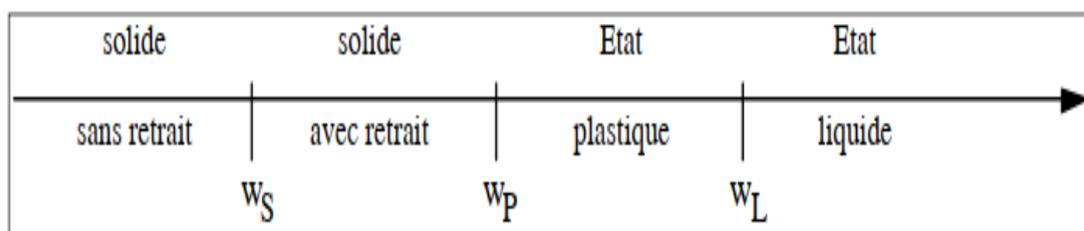


Figure 2.5 : Illustration des différents paramètres des limites d'Atterberg

La teneur en eau d'un sol influe sur son comportement. En effet, pour une valeur élevée de celle-ci le sol se comporte comme un liquide et lorsque celle-ci diminue de façon continue, le sol passe progressivement à l'état plastique puis à l'état solide. Les teneurs en eau qui correspondent

aux passages d'une phase à l'autre sont respectivement la limite de liquidité et la limite de plasticité. Pour déterminer ces différentes limites, on procèdera comme suit :

On prépare dans un premier temps l'échantillon ; pour ce faire le matériau est imbibé d'eau pendant 12h ; puis il est tamisé au tamis de 0,4mm à l'aide d'un pinceau et avec de l'eau. On laisse décanter et on siphonne l'eau avant de laisser le matériau sécher à l'air libre. On obtient ainsi une pâte constituée des passants au tamis 0,4mm qui sera utilisée pour les différents essais.

❖ **La limite de liquidité** : la pâte obtenue au bout du processus ci-dessus décrit est mise dans la coupelle de l'appareil de Casagrande. On trace ensuite un sillon avec l'outil à rainurer ; puis on tourne la manivelle en notant le nombre de choc N jusqu'à fermeture du sillon sur 1 centimètre ; si N est supérieur à 35 on ajoute un peu d'eau au matériau puis on recommence l'essai par contre si elle est inférieur à 15 on laisse sécher le matériau et on recommence. Si N est compris entre 15 et 35 on mesure la teneur en eau du matériau. La limite de liquidité étant par définition la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs, on recommencera l'essai en faisant varier la teneur en eau puis on tracera une droite moyenne entre les deux couples de valeur qui permettra de déterminer la teneur en eau pour $N = 25$.

❖ **La limite de plasticité** : Par définition la limite de plasticité est la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure quand son diamètre atteint 3mm. Pour procéder à l'essai, on fait une boulette de pâte et on la transforme en cylindre en la roulant sur une surface plane sèche et propre ou à la main on forme ainsi un rouleau aminci progressivement jusqu'à 3mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm. S'il y a fissuration on mesure la teneur en eau qui correspond à la Limite de plasticité dans le cas contraire on laisse sécher le matériau et l'on recommence.

❖ **Indice de plasticité** : Il est obtenu en faisant la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. C'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction 0/400 μm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

🌀 La valeur de bleu d'un sol (VBS) (NF P 94-068)

Notons que la valeur au bleu de méthylène est un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques

années. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface des particules contenues dans sa fraction argileuse ($\leq 2 \mu\text{m}$) qui détermine sa surface spécifique, on peut considérer que la valeur de bleu de méthylène VBS (valeur de bleu du sol) exprime globalement la quantité et la qualité (ou activité) de l'argile contenue dans ce sol.

En pratique, on détermine la VBS à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/2 mm. La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol.

Choix entre IP et VBS

L'IP et la VBS d'un sol étant tous deux des paramètres mesurant l'argilosité, il est utile de préciser les domaines respectifs d'application de chacun d'eux dans l'identification des sols. Tout d'abord comme la VBS d'un sol est une grandeur qui exprime globalement et selon une échelle quasi linéaire la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le sol étudié, elle est applicable à l'identification de tous les sols.

Toutefois, l'IP présente dans le cas des sols moyennement à très argileux quelques avantages sur la VBS. D'abord c'est un paramètre pour lequel on dispose d'une longue expérience dans l'interprétation, ensuite il est plus sensible que la VBS dès que les sols deviennent vraiment argileux, enfin et surtout il s'agit d'un paramètre qui est à la fois un paramètre d'identification, mais aussi de comportement. En effet, l'Indice de plasticité définit en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la conception des ouvrages en terre.

🌀 L'essai Proctor Modifié (NF P 94-093)

L'essai Proctor est une opération qui a pour but de déterminer la teneur en eau optimale qui servira de référence pour le compactage et la densité sèche qui sont toutes deux paramètres de l'OPM. L'essai s'effectue comme suit :

Le matériau est au préalable passé au tamis de maille 20 mm puis échantillonner. La masse de matériau de chaque échantillon doit être comprise entre 5 et 15 kg (Généralement 6kg par point d'essai). Le moule utilisé est lubrifié et solidarisé ; puis on introduit au fond du moule un disque d'espacement. L'échantillon est alors humidifié à une teneur en eau donnée puis est introduit dans le moule en 5 couches successives compacté chacune à 56 coups. Après le compactage de la dernière couche la rehausse est retirée et on arase soigneusement le moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. L'ensemble moule et éprouvette de matériau est ensuite pesé puis démouler. On procède ensuite à la prise d'échantillon du matériau démoulé pour prise de teneur en eau. L'essai se fait sur six points à raison de 6 kg par points à différentes teneurs en eau. Pour chaque essai on calcule la teneur en eau et la densité sèche du matériau. Après expression des résultats, on trace une courbe dite la courbe proctor, ainsi, les teneurs en eaux obtenues sont rapportées en abscisse et les densités sèches en ordonnée. A cette courbe, on déduit les valeurs de densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, qui sont les références Proctor du matériau ayant fait l'objet de l'essai.

☉ L'essai CBR (NF P 94-078)

L'essai CBR est un essai permettant de déterminer la portance d'un matériau c'est-à-dire son aptitude à supporter les charges. Elle permet, suivant le processus utilisé, la détermination de :

- ❖ L'indice Portant immédiat (IPI) : qui désigne l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier durant des travaux
- ❖ L'indice C.B.R. immédiat : qui désigne la portance d'un sol compacté à sa teneur en eau optimum.
- ❖ L'indice C.B.R. après immersion : qui désigne la portance d'un sol compacté à sa teneur en eau optimum et soumis à des variations de régime hydrique.

Dans notre cas nous étudierons uniquement l'indice CBR après immersion car c'est celui qui correspond à la situation la plus défavorable dans lequel pourra se trouver notre matériau.

L'essai CBR est une suite de l'essai Proctor et s'effectue comme suit :

Les matériaux sont préparés dans les mêmes conditions que l'essai Proctor. L'énergie de confection des éprouvettes CBR est répartie dans trois moules CBR avec la dame proctor comme suit :

- Matériau compacté à 10 coups par couche sur cinq couches dans moule CBR ;
-

- Matériau compacté à 25 coups par couche sur cinq couches dans moule CBR ;
- Matériau compacté à 56 coups par couche sur cinq couches dans moule CBR ;

A chaque moule, on retire la rehausse avant d'araser soigneusement l'éprouvette (du centre vers la périphérie). Après cela, l'ensemble moule et matériau est pesé au gramme près. On place ensuite un papier filtre à la surface de l'échantillon avant de retourner le moule, on retirera ensuite le disque d'espacement puis après avoir placé un papier filtre sur la face supérieure, le moule est fixé à la plaque de base. Des surcharges sont déposées dans le moule et l'ensemble est immergé pendant quatre jours. Après 4 jours d'immersion, on procède pour chaque éprouvette au poinçonnement, à vitesse constante en notant les efforts de poinçonnement correspondants aux enfoncements de 1, 2,5mm de 2mm de 2,5mm, de 5 mm de 7mm et de 10mm. Puis, on reporte sur un graphe effort-enfoncement les valeurs de poinçonnement obtenu. On procède pour chacune des éprouvettes poinçonnées au calcul suivant :

$$\frac{\text{effort de pénétration à 2,5mm d'enfoncement(KN)}}{13,5} * 100$$
$$\frac{\text{effort de pénétration à 5mm d'enfoncement(KN)}}{20} * 100$$

L'indice CBR recherché pour chaque courbe est la plus grande des deux valeurs. On obtient au bout du processus 3 indices correspondants chacune à une des 3 moules poinçonnées. Ces 3 valeurs permettent de tracer la courbe indice-densité sèche sur laquelle on lit les indices CBR à 90%, 95% et 100 % de la densité sèche maximale.

2.4.2 Notion de fuseau granulaire.

Le fuseau granulaire définit deux courbes limites à savoir la borne inférieure et la borne supérieure à l'intérieur desquelles la granulométrie du matériau devra être logée pour se conformer à l'exigence des cahiers de charge. Nous l'avons utilisé pour montrer que les échantillons utilisés étaient représentatifs pour les essais.

Pour tracer les fuseaux granulométriques, nous sommes partis de plusieurs analyses granulométriques. On a reporté sur un graphique les tamisats cumulés maximal et minimal relatifs à chaque tamis.

Description Mathématique du fuseau granulaire.

Le fuseau granulaire est la zone limite dans laquelle la courbe granulométrique d'un sable peut varier. Les limites du fuseau enveloppe (granulaire) d'un sable sont données par :

$$\begin{cases} X_s = X + 2\sigma \\ X_f = X - 2\sigma \end{cases}$$

Dans ces équations, X_f et X_s sont les valeurs spécifiques inférieure et supérieure ; X la moyenne des passants ; et σ l'écart type des passants, donné par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X)^2}{N-1}$$

Où X_i désigne la donnée mesurée au rang i et N le nombre d'échantillons.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DU RÉSULTATS D'ESSAIS SUR LES MATÉRIAUX, ANALYSES ET INTERPRETATIONS

OBJECTIF DE LA PARTIE

L'objectif de cette partie est de présenter les différents résultats issus des essais réalisés en laboratoire et de faire une analyse scientifique de chacun de ces résultats.

3.1 RÉSULTATS D'ESSAIS SUR LE SABLE SILTEUX

Dans le cadre de notre projet nous avons une quantité énorme de Sable silteux provenant de diverses carrières tous situés dans la commune de Djèregbé. Des nombreux essais réalisés avant l'utilisation sur nos chantiers nous avons recensé 25 échantillons pour mettre en place un fuseau granulaire du silteux. Ce fuseau se présente comme suit :

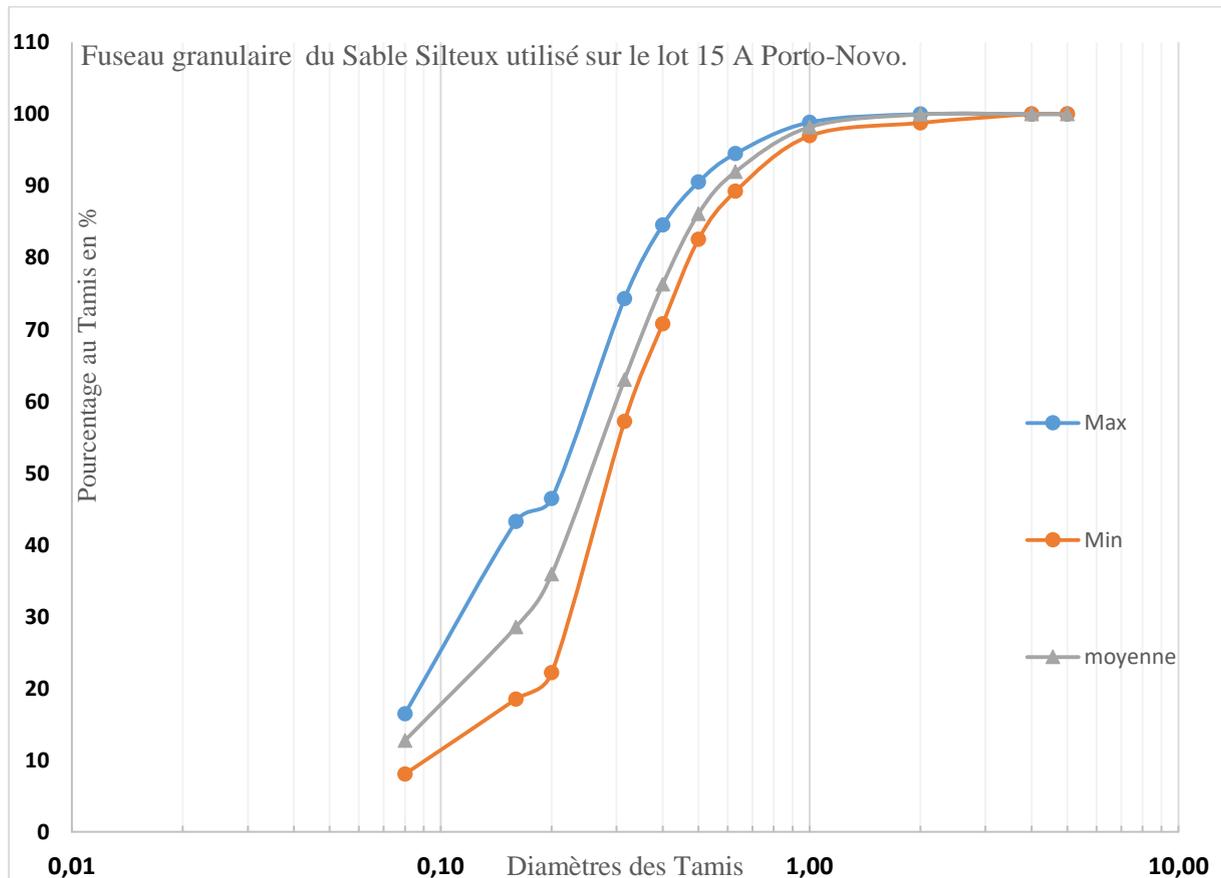


Figure 3.1 : Fuseau granulaire du Sable silteux

Ce fuseau montre que le silteux présente un pourcentage de passant au tamis de 80µm compris entre 8% et 17% pour une moyenne de **13 %**.

Récapitulatifs des autres caractéristiques du Silteux.

Pour mieux tendre vers le matériau de substitution qu'est le silteux il s'avère nécessaire de savoir ses autres caractéristiques. Pour cela nous avons récapitulés dans le tableau ci-dessous le minimum et le maximum des résultats issus des essais effectués sur les 25 échantillons prélevés.

Tableau 3.1 : récapitulatif des essais des paramètres géotechniques du silteux

ESSAIS	Paramètres	Min	Moy	Max
Pourcentage de fines		8,16	12,18	17,42
Limites d'Atterberg	IP	3,00	8,00	12,00
Classification	HRB (Ig)	A-1b (0)	A-1b (0)	A-1b (0)
Proctor Modifié	DS	1,74	1,84	2,00
	W%	4,30	7,61	10,20
CBR après Immersion à 96 heures	100%	33,56	60,24	98,42
	95%	20,97	38,01	50,30
	90%	11,25	22,61	37,75
	Gonflement	0,05	0,09	0,17

Il en découle de ce tableau que le silteux a une proportion de fines comprises entre 8,16% et 17,42%. Vu le caractère non argileux du sable silteux, les Limites d'Atterberg ne sont pas mesurables surtout avec la coupelle lisse. Quelques essais faits avec la coupelle rugueuse donnent une statistique d'indice de plasticité IP qui varie de 3 à 12. C'est un matériau très peu plastique. Cette qualité lui vaut sa présence dans les couches de chaussé puisque son IP prouve qu'il est moins sensible à l'eau. Tous les échantillons analysés sont essentiellement de la classe **A.2.4b** suivant la classification HRB et Appelé **sable limoneux peu plastique**. Il présente un CBR moyen de 38 à 95% de l'optimum Proctor.

Il nous revient à présent de caractériser la terre de barre en vue d'apprécier la possibilité de le substituer en couche de forme.

3.2 ÉTUDE DE LA TERRE DE BARRE

Le prélèvement de la terre de barre a été fait au chantier sur stock provenant de la carrière de terrassement de Sissinkpa (Commune d'Adjohoun) aux coordonnées GPS 6°41'7,51''N //2°29'41,48''E. Il faut préciser qu'il s'agit d'une ancienne carrière ouverte par le groupement d'entreprise KARA/FADOUL dans le cadre du projet d'aménagement et de bitumage de la route Akpro Misséréte – Dangbo – Adjohoun – Bonou – Ouinhi - Kpédékpo (ADABOK) présentement exploité par OFMAS dans son extension.

L'intérêt de cette étude étant de valoriser la terre de barre dans son usage en construction routière, il est donc nécessaire de réaliser les différents essais d'identification complète afin de mieux

connaître ses caractéristiques dans le but de renforcer sa granulométrie, de réduire son indice de plasticité et enfin d'augmenter sa capacité portante.

A cet effet, les essais d'analyse granulométrique, de limites d'Atterberg, de Proctor modifié et de CBR sont entre autres les essais réalisés et se présentent comme suit :

3.2.1 Analyse granulométrique sur la terre de barre.

L'analyse granulométrique réalisée sur le matériau a permis d'obtenir la courbe granulométrique de la figure ci-dessous :

Tableau 3.2 : Résultat de l'analyse granulométrique sur la TB.

Terre de barre de Sissinkpa		
Module	Ouvertures tamis en mm	% Passant
38	5	100
37	4	100
36	3,15	100
35	2,5	97
34	2	96
32	1,25	91
31	1	89
29	0,63	81
28	0,5	76
27	0,4	72
26	0,315	66
25	0,25	61
24	0,2	57
23	0,16	54
22	0,125	51
21	0,1	50
20	0,08	50
19	0,063	49

Il en découle la courbe granulométrique suivante :

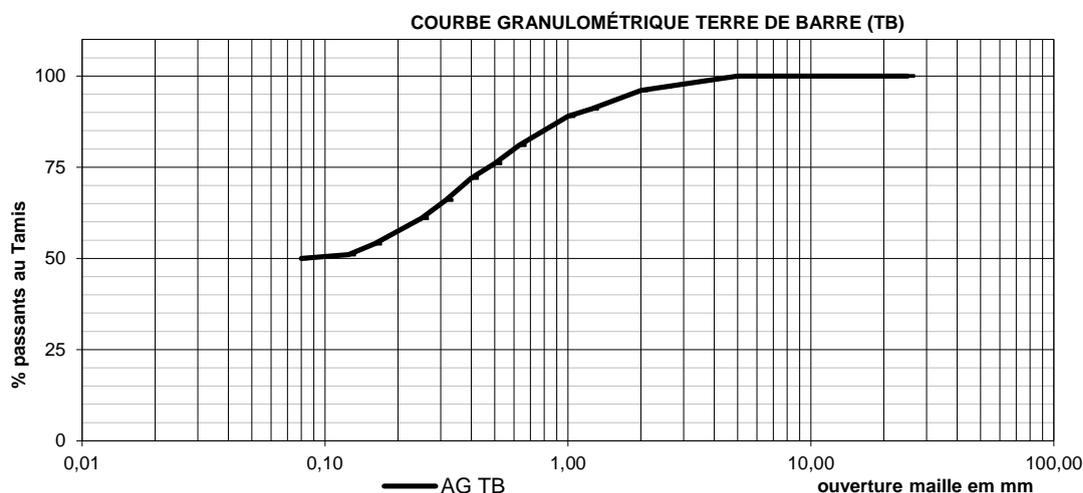


Figure 3.2. Courbe granulométrique de la Terre de Barre.

Afin de confirmer la représentativité de l'échantillon étudié avec les nombreux prélèvements effectués à l'emprunt, nous allons intégrer la courbe granulométrique ainsi tracé dans le fuseau granulaire. Ceci nous permettra de voir si la courbe est inscrite dans les bornes du fuseau.

Tableau 3.3 : Intégration de la TB étudiée dans les bornes de celle en place.

Ouvertures des Tamis	Borne Inférieure	Terre de Barre Etudiée	Borne Supérieure
	% passant	% passant	% passant
5,00	100,0	100,0	100,0
4,00	100,0	100,0	100,0
3,150	100,0	100,0	100,0
2,500	99,0	97,0	100,0
2,000	94,0	96,0	100,0
1,250	88,0	91,0	99,0
1,000	83,0	89,0	97,0
0,630	75,0	81,0	92,0
0,500	72,0	76,0	86,0
0,400	67,0	72,0	82,0
0,315	61,0	66,0	79,0
0,250	54,0	61,0	73,0
0,160	45,0	54,0	70,0
0,125	42,0	51,0	69,0
0,080	39,0	50,0	67,0
0,063	36,0	49,0	66,0

On remarque aisément l'inscription des valeurs dans chaque borne du plus petit diamètre au plus grand. La figure ci-dessous nous l'illustre une fois de plus.



Photo 3.1 : Séchage de la Terre de barre et préparation des échantillons pour Essai.

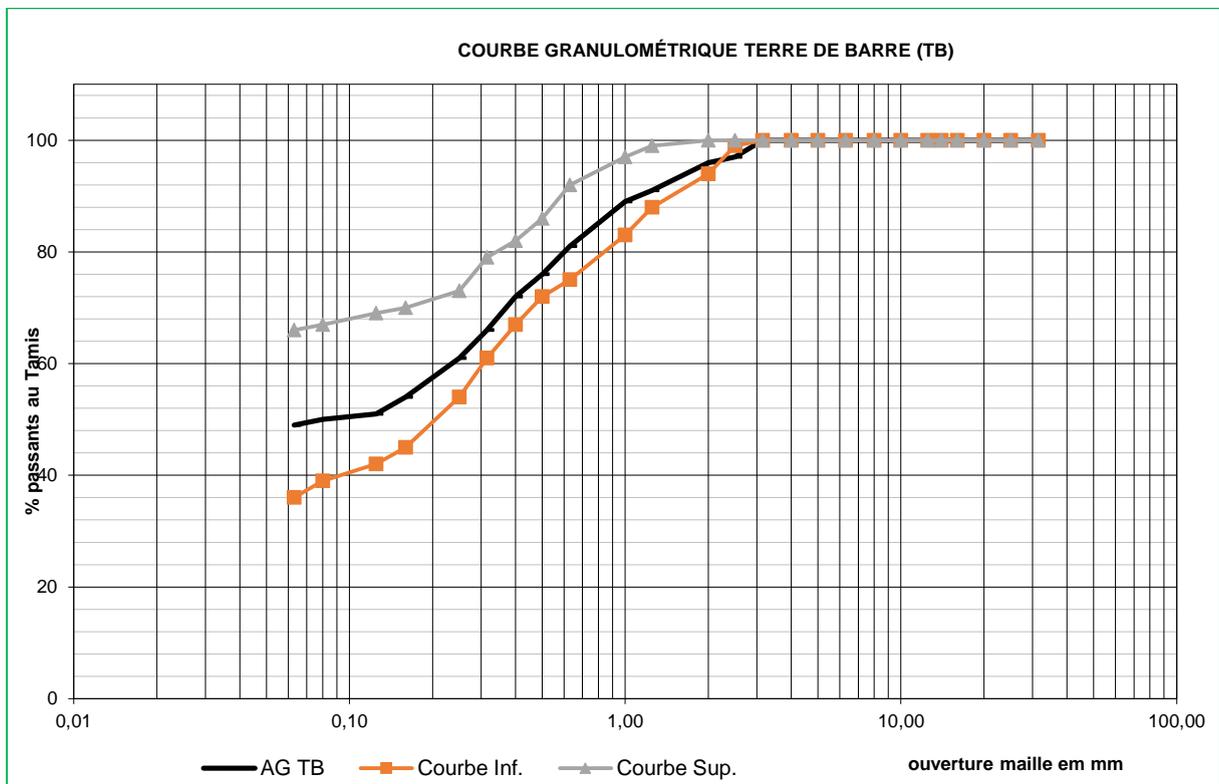


Figure 3.3 : Courbe granulométrique de la TB représentée dans le fuseau de la terre de barre.

3.2.2 Détermination des limites d'Atterberg

Les essais de détermination des limites d'Atterberg réalisés sur la Terre de barre ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.4 ci-dessous :

Tableau 3.4 : Résultats des Limites d'Atterberg de la TB étudiée.

Nombre de coups :	LIMITE DE LIQUIDITE				
	18	22	26	30	34
Numéro de la tare :	B'	20	D	26	E0
Poids total humide :	20,1	21,03	15,07	16,34	15,27
Poids total sec :	16,79	17,73	12,1	13,32	12,27
Poids de la tare	9,34	10,22	5,27	6,3	5,23
Poids d'eau :	3,31	3,3	2,97	3,02	3
Poids du sol sec :	7,45	7,51	6,83	7,02	7,04
Teneur en eau (%) :	44,4	43,9	43,5	43,0	42,6
Moyenne (%) :	44,4	43,9	43,5	43,0	42,6

<i>Limites d'Atterberg</i>	<i>Valeurs obtenues</i>
LIMITE DE LIQUIDITE : W_L en %	44
LIMITE DE PLASTICITE : W_P en %	27
INDICE DE PLASTICITE : $I_P = W_L - W_P$	17

La

courbe de Limites d'Atterberg se présente comme suit :

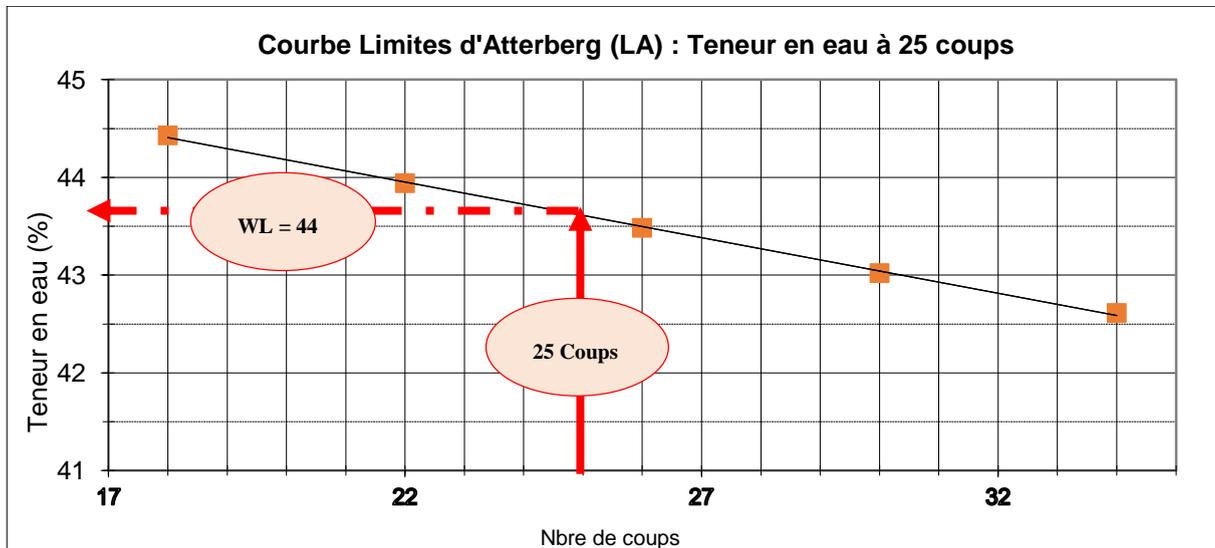


Figure 3.4 : Courbe de Limites d'Atterberg de la Terre de Barre

3.2.3 Essai Proctor Modifié

La référence Proctor obtenue après l'essai Proctor Modifié sur la terre de barre a donné les valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.5 : Essai Proctor Modifié de la TB étudiée.

<i>Essai Proctor modifié</i>	<i>Valeurs obtenues</i>
Densité sèche maximum	1,88 T/m ³
Teneur en eau optimum	14,7 %

3.2.4 Essai CBR

Pour rappel, l'essai CBR est une suite de l'essai Proctor où le matériau est mouillé à la teneur en eau optimale (WOPM) précédemment déterminée par l'essai Proctor. Il est donc compacté après homogénéisation à trois différentes énergies de compactage à savoir 10 coups, 25 coups et 56 coups par couche à raison de cinq couches par série d'essai. Après quatre jours d'imbibition s'en suit l'opération de poinçonnement et le traitement des résultats. L'analyse des courbes Effort – Pénétration permet de déterminer les indices portants CBR (ICBR) de notre Terre de Barre résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.6 : CBR de la TB étudiée.

CBR (90%OPM)	CBR (95%OPM)	CBR (100%OPM)
15,0	22,0	45,0

Récapitulatif des résultats d'essais sur Terre de Barre de Sissinkpa

Tableau 3.7 : Comparaison Caractéristiques de la Terre de Barre (TB) étudiée et recommandations du CCTP du projet en Couche de Forme et Fondation.

Essais	Terre de barre de Sissinkpa		Exigences CCTP		Conformité
			FORME	FONDATION	
Analyse Granulométrique AG NF EN 933-1	Passant au Tamis de 2 mm	96	SO	≤ 50	Non Conforme
	Taux de Fines au tamis 0,080 mm	50	≤ 35	< 25	Non Conforme
Limites d'Atterberg NF P 94 - 051	WL	44	< 40	< 40	Non Conforme
	IP	17	≤ 25	< 20	Conforme
Optimum Proctor Modifié NF P 94-093	Yd (Densité sèche) en T/m3	1,88	≥ 1,80	≥ 1,80	Conforme
	WOPM en %	14,7			
Indice CBR Immersion NF P 94 - 078	100%OPM en KN	45			
	95%OPM en KN	22	≥ 25	> 30	Non Conforme
	Gonfl. Lin. en %	0,145	< 1	< 0,5	Conforme
Classification HRB (Highway Research Board) Bureau de Recherche Routier		A ₇₋₆			
Classification GTR (Guide de Terrassements Routier)		A ₂			
Dénomination géotechnique		Sable fin argileux			

3.3 Conclusion

De l'ensemble des essais réalisés sur la terre de barre, nous remarquons qu'il se retrouve bien dans le fuseau granulométrique de l'ensemble des prélèvements de TB effectués. Ce qui nous permet de confirmer que l'échantillon étudié est représentatif et peut être caractéristique de notre étude.

Au terme des différents essais réalisés, on retient qu'il s'agit d'un sol argileux de **classe A₇₋₆** selon la classification HRB avec :

- un **taux de fines** de **50%** obtenu par l'analyse granulométrique au tamis de 0,080 mm contre une **exigence ≤ 35% en Forme**;
- un **indice de plasticité** de **17** obtenu par l'essai de Limites d'Atterberg contre une **exigence ≤ 25% en Forme (ok)** ;
- une **Limite de liquidité** de **44** obtenu par l'essai de Limites d'Atterberg contre une **exigence < 40% en Forme** ;

- un **indice CBR après immersion de 22 KN à 95%OPM** obtenu par l'essai CBR contre une exigence ≥ 25 KN en Forme ;
- un **gonflement linéaire de 0,145%** contre une exigence $< 1\%$ en Forme (ok)

Or pour que notre terre de barre soit mise en œuvre en couche de forme selon les exigences du CEBTP 1984 amélioré 2019 et le Cahier de prescriptions techniques du projet Asphaltage, elle doit avoir un CBR Supérieur ou égale à 25, une Densité sèche à 1,8 t/m³ et un Indice de Plasticité inférieur ou égale à 25.

Au regard des résultats obtenus sur la terre de barre de Sissinkpa, nous avons fait une comparaison rapide avec le sable Silteux afin d'apprécier les résultats d'essais au niveau de leurs paramètres respectifs.

Tableau 3.8 : Comparaison des caractéristiques de la TB étudiée et Résultats sable silteux

Essais	Terre de barre de Sissinkpa		Sable silteux en Couche de Forme et Fondation		
				Exigences CCTP	
				FORME	FONDATION
Analyse Granulométrique AG NF EN 933-1	Passant au Tamis de 2 mm	96	-		
	Taux de Fines au tamis 0,080 mm	50	13	< 35	< 25
Limites d'Atterberg LA NF P 94 - 051	WL	44	35	< 40	< 40
	IP	17	8	< 25	< 20
Optimum Proctor Modifié OPM NF P 94-093	Yd (Densité sèche) en T/m ³	1,88	1,84	$\geq 1,80$	$\geq 1,80$
	WOPM en %	14,7	7,6		
Indice CBR Immersion NF P 94 - 078	100%OPM en KN	45	60		
	95%OPM en KN	22	38	> 20	> 30
	Gonfl. Lin. en %	0,145	0,09	< 1	< 0,5
Classification HRB (Highway Research Board)		A ₇₋₆	A ₂₋₄		
Classification GTR (Guide de Terrassements Routier)		A ₂	B ₁		
Dénomination géotechnique		Sable fin argileux	Sable silteux	-	-

En comparant les résultats d'essais de ces deux matériaux (Terre de Barre et sable silteux), nous notons au niveau de la Terre de Barre :

- un Taux de fines élevé ;
- une faible valeur de l'indice CBR à 95%OPM ;

- une limite de liquidité élevée.

Il revient donc, d'améliorer sa capacité portante en modifiant sa classe granulaire de manière à réduire sensiblement sa plasticité.

Pour cela, le nouveau matériau à mettre en place à base de cette terre de barre sera déterminé par la technique dite de **litho stabilisation**.



Photo 3.2 : Compactage Eprouvettes CBR

3.4. LA TECHNIQUE DE LA LITHO STABILISATION

3.4.1 Définition

La litho Stabilisation est une technique qui consiste dans notre cas précis à améliorer les performances de la terre de barre par adjonction d'une quantité de sable concassé de granite déterminée en conséquence en vue de leur utilisation en assise des chaussées. L'apport de sable concassé de granite aura pour rôle d'amaigrir l'argile du matériau en diminuant le taux de fines tout en améliorant conséquemment son indice portant CBR. Cette technique de traitement des matériaux pour les constructions routières est très efficace dans la mesure où elle donne de bons résultats géotechniques. Toutefois, la litho stabilisation reste encore très peu connue et peu pratiquée de nos jours dans les projets routiers en Afrique.

3.4.2 Mise en œuvre

Pour la mise en œuvre sur chantier de la litho stabilisation du mélange Terre de barre + Sable concassé 0/5 en corps de chaussée (Exemple d'une couche de fondation), deux méthodes se présentent :

- La production du mélange par une centrale de malaxage et approvisionnement direct sur chaussée ;
- La production du mélange sur place sur chaussée.

Au niveau de la centrale de malaxage, le mélange se fait par l'introduction de la formulation dans l'afficheur de la commande qui affiche les taux par matériau. A cet effet, la terre de barre et le sable concassé sont convoyés par trémie qui au bout d'un processus sort un mélange homogène. Ce mélange fera l'objet d'un prélèvement pour divers essais au laboratoire.

En ce qui concerne la deuxième méthode, il s'agit du mélange sur place des deux matériaux. Cette méthode consiste à approvisionner la terre de barre sur une épaisseur bien définie sur l'emprise de la chaussée, par la suite compléter une deuxième couche en sable concassé 0/5 d'épaisseur prédéfinie de manière à obtenir le mélange souhaité au moyen d'une recycleuse.

Il convient de noter que la mise en œuvre de la litho stabilisation comme tout matériau amélioré, demande un contrôle de suivi des différents matériaux entrant dans sa composition. Ainsi dans le souci de respecter tous les paramètres qui entre dans la mise en œuvre de la technique de la Litho-stabilisation, il se résume la méthodologie suivante :

- Approvisionnement et épandage de la terre de barre à l'état naturel ; réglage sans compactage ;
- Humidification partielle de terre de barre répandue par passage d'une citerne à eau munie d'une rampe de distribution ;
- Approvisionnement et épandage du sable concassée sur la terre de barre précédemment répandue à l'état naturel ;
- Recyclage des deux matériaux à l'aide d'une recycleuse,
- Lorsque le mélange est jugé homogène et la teneur en eau suffisante, on réalise ainsi un compactage en grande partie au compacteur a pneu et parachevé au compacteur vibrant.

En résumé, le malaxage de la litho stabilisation à la centrale est la plus recommandée car elle assure une meilleure homogénéité mais demande le déploiement de plus de moyen.

3.5. ETUDES SUR LE SABLE CONCASSÉ 0/5

3.5.1 Définition.

Le sable concassé 0/5 est obtenu du concassage des roches granitiques. Il est utilisé dans le projet routier dans plusieurs domaines tels que constituant des granulats pour mélange bitumineux, la production du béton hydraulique, les remblais hydrauliques aux droits des ouvrages d'assainissement ainsi que matériau constituant la structure des chaussées.

Le processus d'obtention de ce matériau issu des roches granitiques est déjà décrit dans le présent document au *Chapitre 1* intitulé : <<1.2 les sables granitiques 0/5 en technique routière>>.



Photo 3.3 : Séchage du Sable Concassé 0/5 et préparation des échantillons pour Essai.

3.5.2 Choix du sable concassé

Afin de se conformer à la classe granulaire de la terre de barre et de réduire sensiblement la plasticité qu'offre ce matériau argileux, nous avons opté pour le sable granitique concassé de classe 0/5. L'amaigrissement de la terre de barre au sable concassé pourra générer un mélange homogène d'une granulométrie moyenne de classe 0/5 et va impacter positivement dans la diminution de l'indice de plasticité. C'est donc au vu de cette analyse que nous avons orienté notre étude de litho stabilisation sur le choix du sable concassé 0/5 de Tan, commune de Zagnanado.

3.5.3 Analyse granulométrique du sable concassé 0/5

L'identification du sable concassé par les essais courants de laboratoire s'avère nécessaire afin d'apprécier les caractéristiques de ce dernier. Pour cela, quelques essais ont été fait sur l'échantillon du tas gerbé. Il s'agit notamment de l'analyse granulométrique, du Proctor modifié, de CBR et de l'Equivalent de Sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique réalisé sur le tas gerbé stocké au poste d'enrobé, donne le résultat suivant :

Tableau 3.9 : Résultat de l'Analyse Granulométrique du sable concassé 0/5

Tamis (mm)	Sable concassé 0/5
8,00	100
6,30	90
5,00	78
4,00	70
3,15	64
2,50	57
2,00	53
1,25	45
1,00	42
0,630	35
0,500	32
0,400	30
0,315	26
0,250	24
0,200	21
0,160	19
0,125	18
0,100	17
0,08	16
0,063	16

De ce tableau, il découle la courbe granulometrique du sable concassé granitique 0/5mm (Figure 3.5).

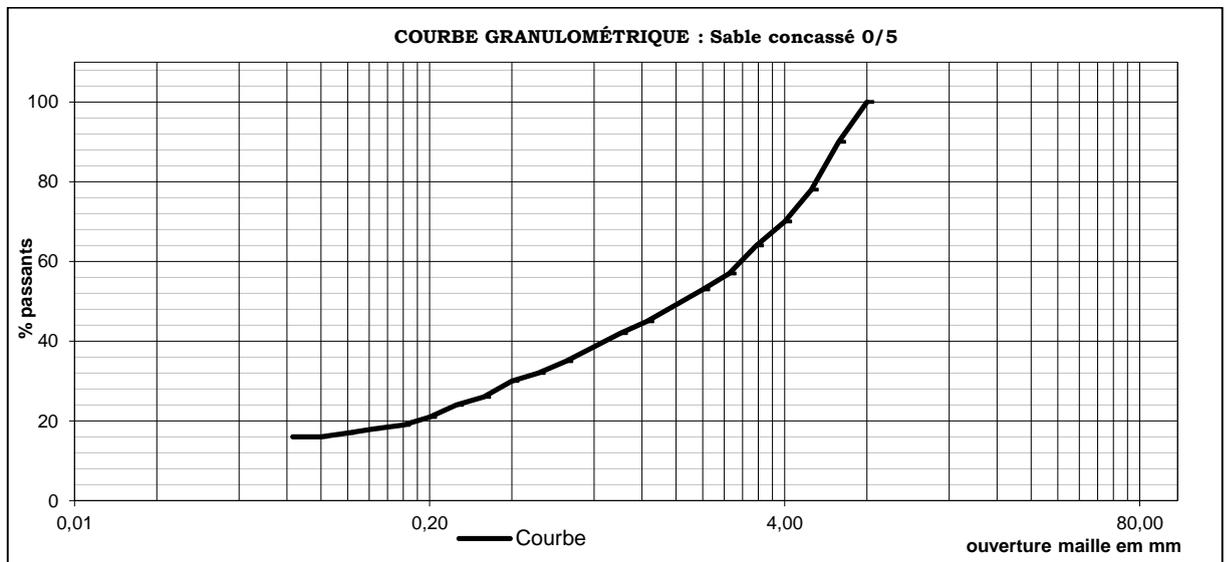


Figure 3.5 : Courbe granulométrique Sable Concassé 0/5.

Par ailleurs, pendant toute la durée du chantier, une grande quantité de sable concassé 0/5 a été utilisée pour la production de l'enrobé en grave bitume 0/20 et béton bitumineux 0/14. Pour pouvoir définir une plage caractéristique de ce sable dans la suite de nos essais, nous avons tracé un fuseau sur la base d'un certain nombre d'échantillons recueillis durant la période du chantier. Ce fuseau se présente comme suit.

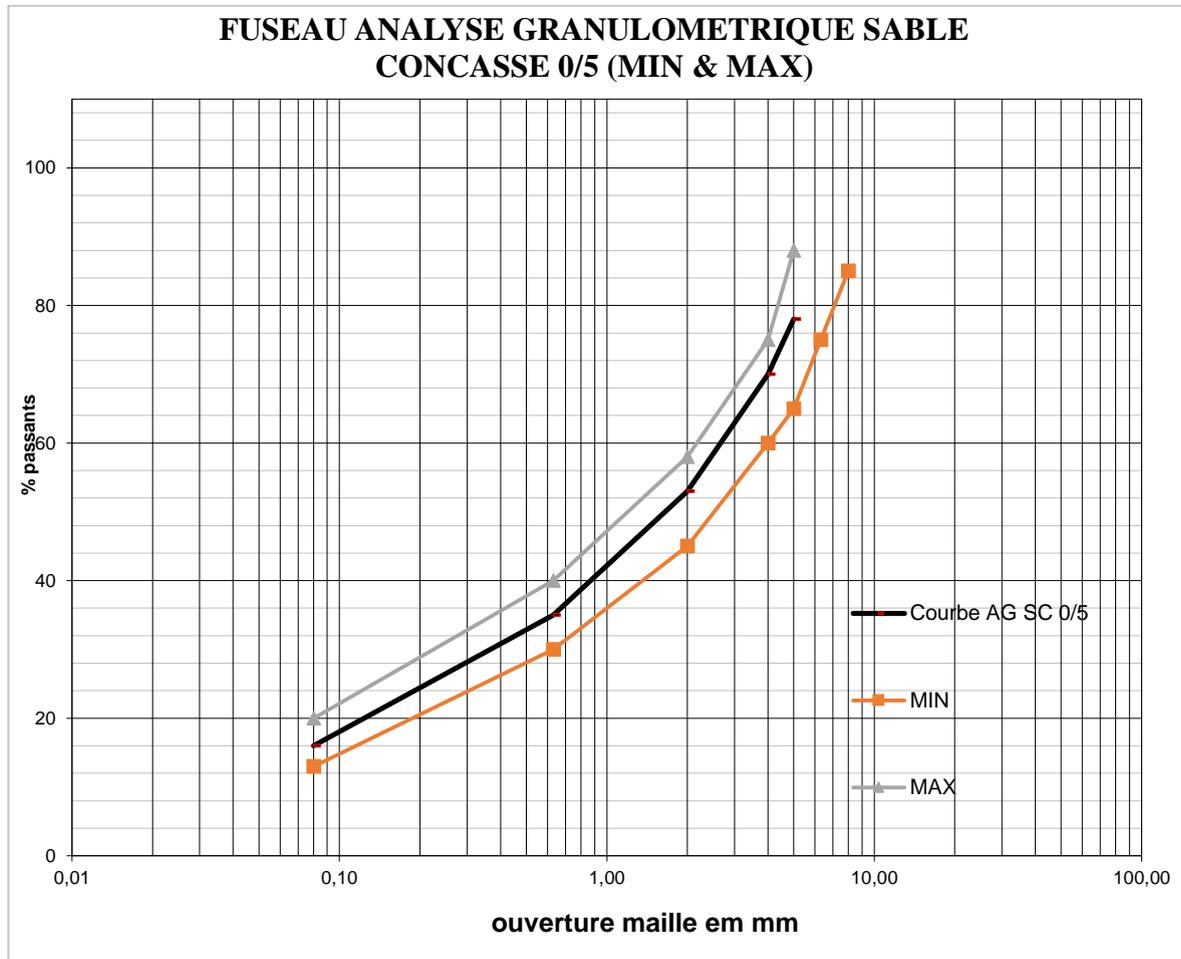


Figure 3.6 : Fuseau granulométrique du sable concassé avec intégration de la courbe granulométrique de l'AG de l'échantillon étudié.

Après étude de sa granulométrie nous avons calculé son Coefficient de courbure et son coefficient d'uniformité.

Tableau 3.10 : Coefficient de courbure et d'uniformité le sable concassé 0/5

D ₁₀	0,173
D ₃₀	0,228
D ₆₀	0,300
Coefficient de courbure C _c	1,004

Coefficient d'uniformité Cu	1,731
-----------------------------	--------------

L'analyse de ce tableau montre que le sable concassé 0/5 a une granulométrie serrée ($Cu = 1.731 < 2$) et a une granulométrie bien répartie ($1 < Cc = 1.004 < 3$).

3.5.4 Essai Proctor Modifié

L'essai Proctor réalisé sur le sable concassé dans le respect de la norme NF P 94- 093 a donné les références (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.11 : Essai Proctor Modifié de sable concassé étudiée.

<i>Essai Proctor modifié</i>	<i>Valeurs obtenues</i>
Densité sèche maximum	2,15 T/m ³
Teneur en eau optimum	6,9 %

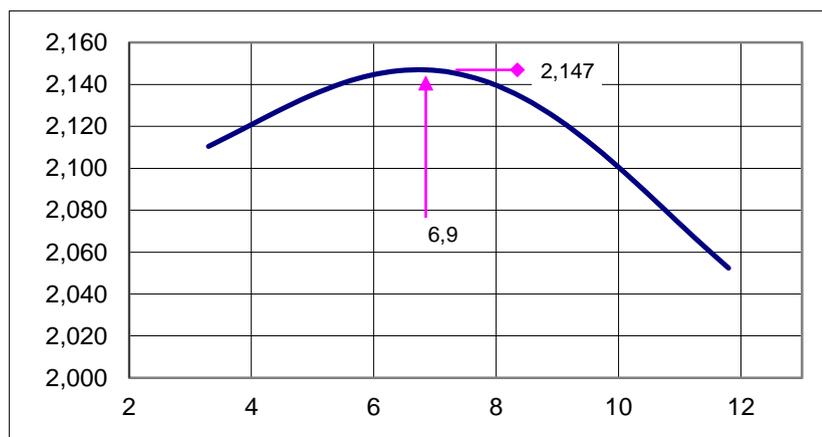


Figure 3.7 : Courbe Proctor modifié du sable concassé

3.5.5 Essai CBR

L'indice CBR immersion après 96 HEURES d'imbibition de sable concassé donne les valeurs suivantes :

Tableau 3.12: CBR du sable concassé 0/5 étudiée

	CALCUL DES INDICES PORTANTS CALIFORNIENS (ICBR Immersion)		
	56 coups	25 coups	10 coups
	CBR (100%OPM)	CBR (95%OPM)	CBR (90%OPM)
CBR	268	239	122

Le tableau suivant présente le récapitulatif des résultats d'essais sur le sable concassé 0/5 de TAN avec les seuils de comparaison du CCTP des travaux et des exigences du CEBTP1984.

Tableau 3.13: Récapitulatif des résultats d'essais sur Sable Concassé 0/5

Essais	Sable concassé 0/5 de TAN		Exigences CCTP		Conformité
			FORME	FONDATION	
Analyse Granulométrique AG NF EN 933-1	Passant au Tamis de 2 mm	53	SO	≤ 50	Non Conforme
	Taux de Fines au tamis 0,080 mm	16	< 35	< 25	Conforme
Limites d'Atterberg LA NF P 94 - 051	WL	Non mesurable	< 40	< 40	Conforme
	IP		< 25	< 20	Conforme
Optimum Proctor Modifié OPM NF P 94-093	Yd (Densité sèche) en T/m3	2,15	≥ 1,80	≥ 1,80	Conforme
	WOPM en %	6,9			
Indice CBR Immersion NF P 94 - 078	100% OPM en KN	263			
	95% OPM en KN	242	> 20	> 30	Conforme
	Gonfl. Lin. en %	0,043	< 1	< 0,5	Conforme
Masse Volumique Réelle (MVR) en t/m3		2,66			
Densité Apparente (DA) en t/m3		1,70			
Classification HRB (Highway Research Board) Bureau de Recherche Routier		A7-6			
Classification GTR (Guide des Terrassements Routiers)		B5			
Dénomination géotechnique		Sables et Graves très silteux			

Le sable concassé 0/5 est très dense de par sa masse volumique réelle, sa densité apparente et sa densité sèche. Son fort taux d'éléments fins est un atout pour améliorer la plasticité de la terre de barre et augmenter sa performance. Pour cela il sera ajouté à des proportions progressives de 15%, 20%, 25% et 30%. Le chapitre 4 qui suit nous présentera les résultats et analyse de nos essais.

3.6 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTAS DE LITHOSTABILISATION.

3.6.1 Matériau Terre de barre – Sable concassé

Dans le but de proposer un nouveau matériau routier en couche d'assise de chaussée, nous avons initié une étude pour déterminer les propriétés physico-mécaniques de la terre de barre améliorée au sable granitique concassé 0/5. La terre de barre étant un matériau utilisé jusque-là en travaux de terrassement est bien disponible dans la partie méridionale du BENIN en l'occurrence à PORTO NOVO et ses environs.

Nos études d'améliorations avec le sable granitique concassé 0/5 sont dans les proportions de 15% (TB85SC15), 20% (TB80SC20), 25%(TB75SC25) et 30% (TB70SC30). TBxSCy représente le mélange obtenu en prenant pour la Terre de Barre x% de la masse finale du mélange et pour le Sable Concassé y% de la masse finale du mélange.

Chaque nouveau matériau a été ensuite soumis aux essais d'analyse granulométrique d'essais CBR, de Proctor, et de limites d'Atterberg.

3.6.2 Analyse granulométrique des différents mélanges

Tableau 3.14: Résultat de l'analyse granulométrique de la Terre de barre et des Terres de barre améliorés à plusieurs pourcentages.

ESSAI D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE							
ESSAIS	Tamis (mm)	Terre de barre TB100SC 0	Sable concassé TB0SC1 00	TB85SC 15	TB80SC 20	TB75SC 25	TB70SC 30
Analyse Granulométrique (AG)	8,00	100	100	100	100	100	100
	6,30	100	90	100	100	100	100
	5,00	100	78	98	98	95	97
	4,00	100	70	96	96	93	94
	3,15	100	64	95	94	91	90
	2,50	97	57	93	92	89	88
	2,00	96	53	91	90	86	85
	1,25	91	45	86	85	80	79
	1,00	89	42	84	83	79	76
ESSAIS	Tamis (mm)	Terre de barre TB100SC 0	Sable concassé TB0SC1 00	TB85SC 15	TB80SC 20	TB75SC 25	TB70SC 30
Analyse Granulométrique (AG)	0,630	81	35	77	76	71	69
	0,500	76	32	72	73	66	64
	0,400	72	30	68	68	63	60
	0,315	66	26	63	62	57	55

0,250	61	24	58	59	52	50
0,200	57	21	54	54	48	46
0,160	54	19	50	51	45	43
0,125	51	18	46	43	42	39
0,100	50	17	43	41	38	35
0,08	50	16	40	37	33	30
0,063	49	16	39	36	33	29

Les essais granulométriques réalisés sur les échantillons de terre de barre améliorée au sable lagunaire à différents pourcentages ont permis d'obtenir les courbes de la figure ci-dessus.



Photo 3.4 : Analyse granulométrique des mélanges Terre de Barre et Sable Concassé.

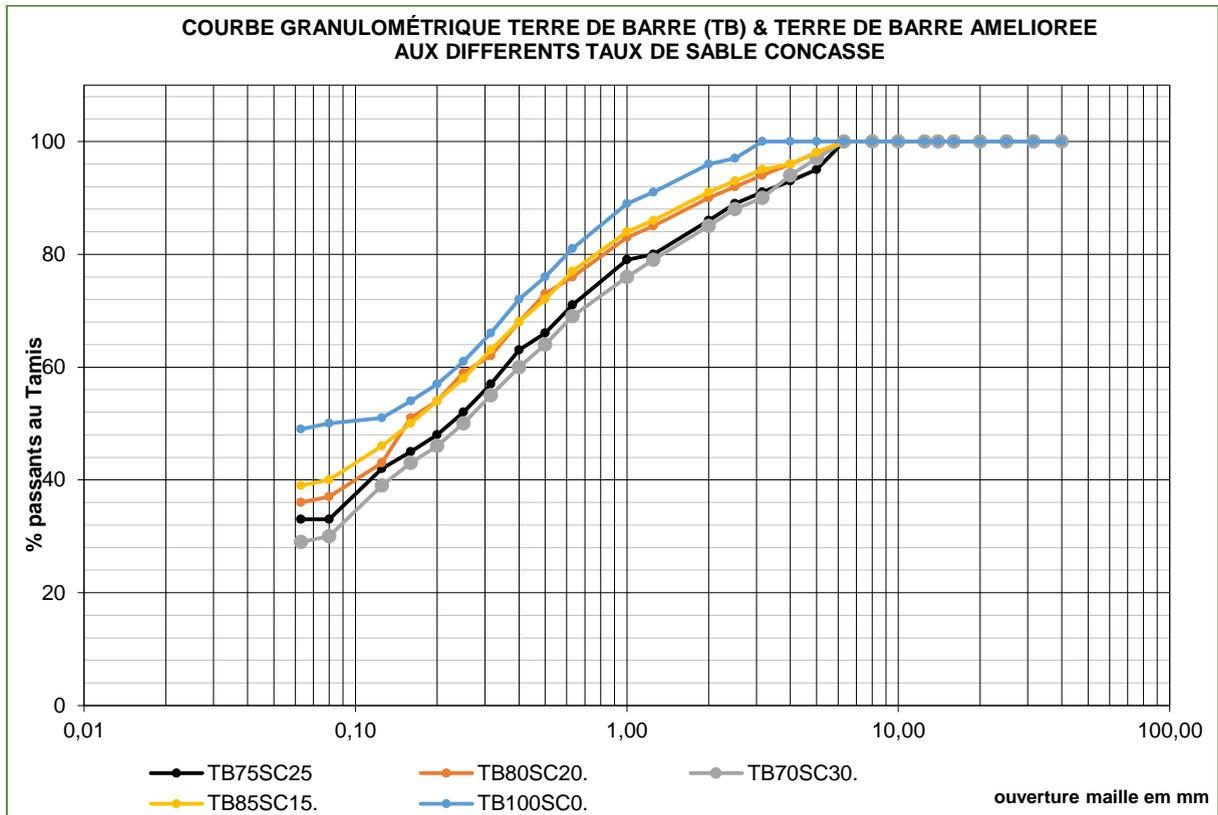


Figure 3.8 : Courbe granulométrique de la Terre de barre et des Terre de barre améliorés à différents taux.

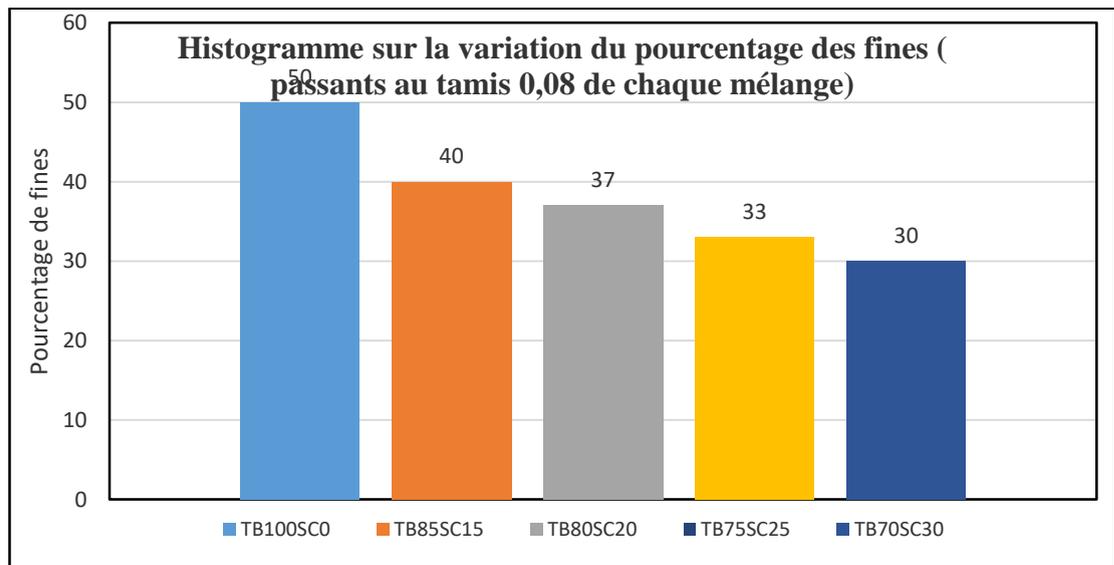


Figure 3.9 : Histogramme permettant d'observer la variation du pourcentage des fines.

En observant ces graphes, on remarque que l'objectif de rabaisser le taux de fines est atteint. On note au fur et à mesure que le pourcentage de sable concassé augmente (15% à 30%), le pourcentage de fines au tamis 80 microns diminue substantiellement de 50% pour le matériau cru à 30% pour le matériau TB70S30.

3.6.3 Résultats des essais de Proctor modifié

Après réalisation des essais de Proctor modifié sur les différents échantillons de terre de barre améliorée à différents pourcentages de sable concassé 0/31.5, nous avons obtenu les différentes teneurs en eau et densités sèches consignées dans le tableau suivant :

Tableau 3.15 : Résultats de l'optimum Proctor de la Terre de barre et des Terres de barre améliorés à 15%, 20% ,25% et 30%.

Pourcentage d'eau de moulage (%)	TB100S0		TB85S15		TB80S20		TB75S25		TB70S30	
	Densité Sèche	Teneur en Eau								
8	1,46	9,2	1,70	8,2	1,82	8,0	1,85	7,7	1,83	7,5
10	1,68	11,4	1,92	10,4	1,93	10,2	1,94	9,8	1,94	9,4
12	1,86	13,6	1,97	12,5	1,98	12,4	1,98	11,6	2,00	11,2
14	1,85	15,7	1,87	14,8	1,89	14,5	1,93	13,4	1,91	13,5
16	1,69	17,9	1,72	16,9	1,77	16,3	1,79	15,7	1,8	15,6



Photo 3.5 : Mélanges Terre de Barre et Sable Concassé 0/5 à divers pourcentages



Photo 3.6 : Proctor : Mouillage du matériau-Malaxage-Compactage & Arasement.

Courbes des Proctor Modifié de la terre de barre crue et Terre de barre améliorée aux différents pourcentages de Sable Concassé

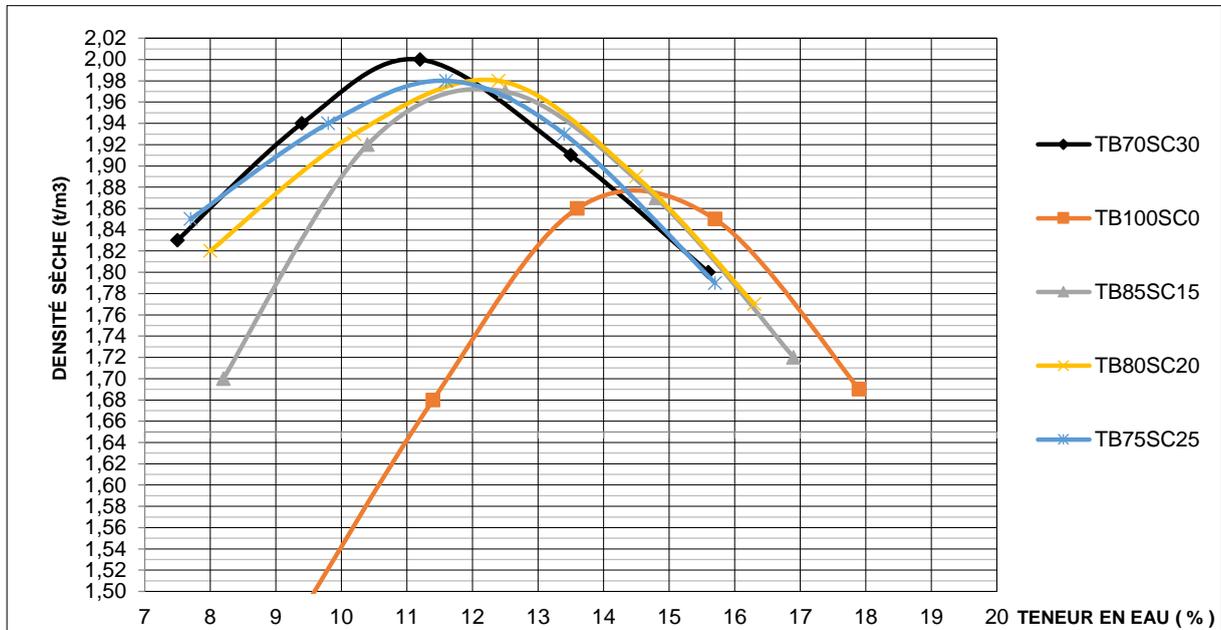


Figure 3.10 : Courbe Proctor de la Terre de barre et des différents mélanges

De ces courbes nous avons la Masse volumique sèche maximale de la terre de barre et des différents mélanges. Ces dernières sont présentées sous forme d'histogramme sous la figure ci-dessous :

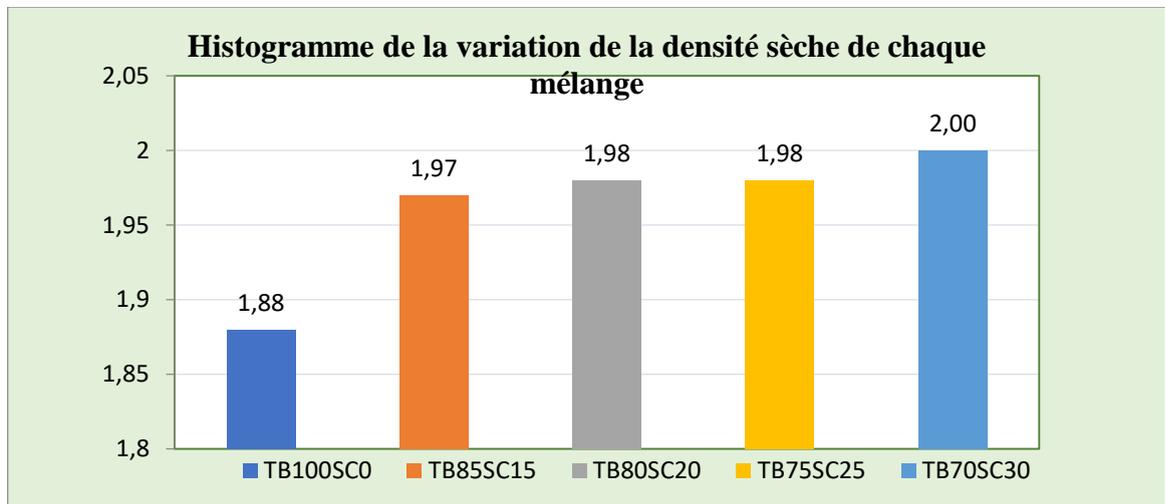


Figure 3.11 : Variation de la densité sèche pour la terre de barre et des différents mélanges étudiés.

Du graphique précédent, nous remarquons que la densité sèche maximale croît au fur et à mesure que le pourcentage de sable granitique augmente. Elle passe de 1,88 t/m³ pour la Terre de barre à l'état naturel à 1,98 t/m³ pour le mélange obtenu avec 30% de sable granitique concassé.

Un second paramètre en ressort lors des essais Proctor. Il s'agit de la Teneur en Eau de la terre de barre et des différents mélanges. L'histogramme ci-dessous nous présente le comportement de la teneur en eau au fur et à mesure de la variation des pourcentages de sable.

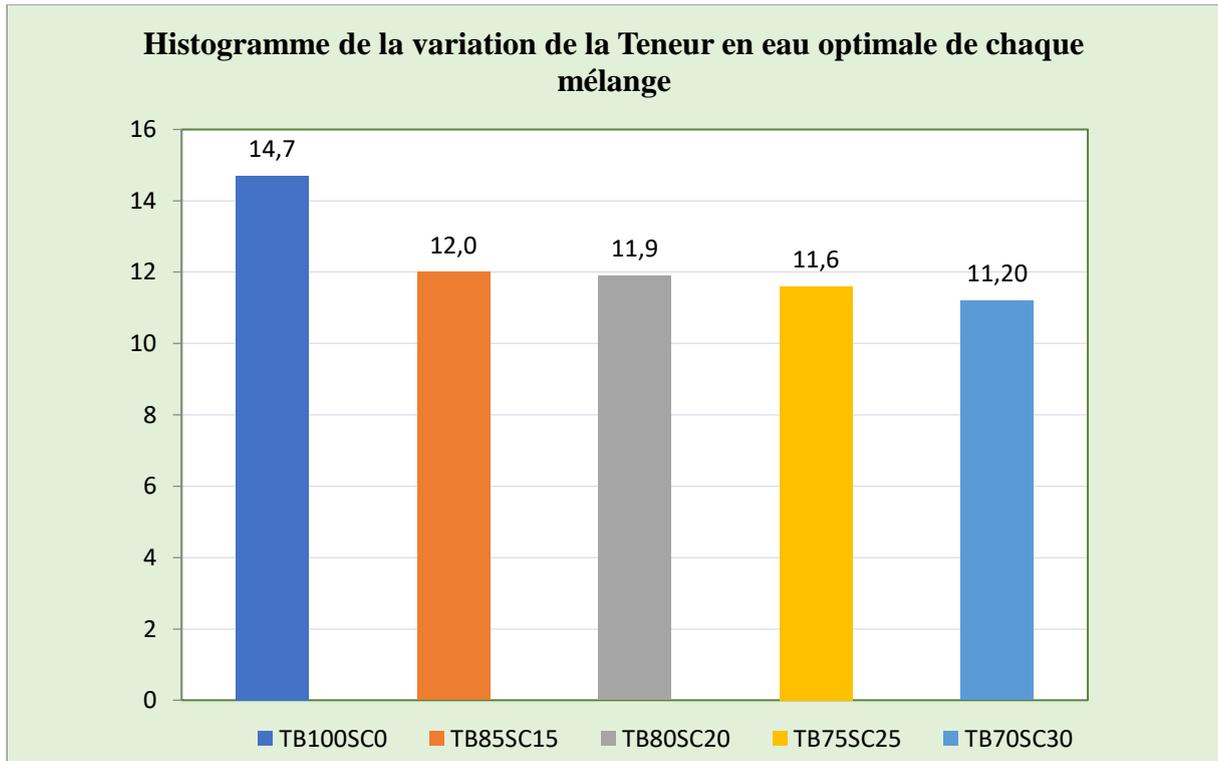


Figure 3.12 : Variation de la teneur en eau optimale pour la Terre de barre et des différents mélanges étudiés à plusieurs pourcentages.

En observant l'histogramme, on constate que la teneur en eau optimale connaît une variation à la baisse au fur et à mesure que le taux du sable concassé augmente.

3.6.4 Résultats des Limites d'Atterberg

Pour mieux apprécier les divers matériaux composés du point de vue plasticité, nous les avons soumis chacun aux Limites d'Atterberg. Il en ressort des résultats dont les valeurs sont contenues dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.16 : Résultat des limites d'Atterberg de la Terre de barre et des Terres de barre améliorés.

Matériaux	LA		
	LL	LP	IP= LL-LP
TB100S0	44	27	17
TB85S15	43	27	16
TB80S20	43	27	16
TB75S25	42	27	15
TB70S30	40	25	15

On remarque de façon générale que l'Indice de Plasticité (IP) du mélange chute aux différents taux de Sable concassé. On récapitule les valeurs des Indices de Plasticité comme suit :

TB100SC0 (100% Terre de Barre et 0% Sable concassé) : IP=17 ;

TB85SC15 : IP=16 ;

TB80SC20 : IP=16 ;

TB75SC25 : IP=15 ;

TB70SC30 : IP=15 ;

On remarque néanmoins une certaine constance autour de 16.

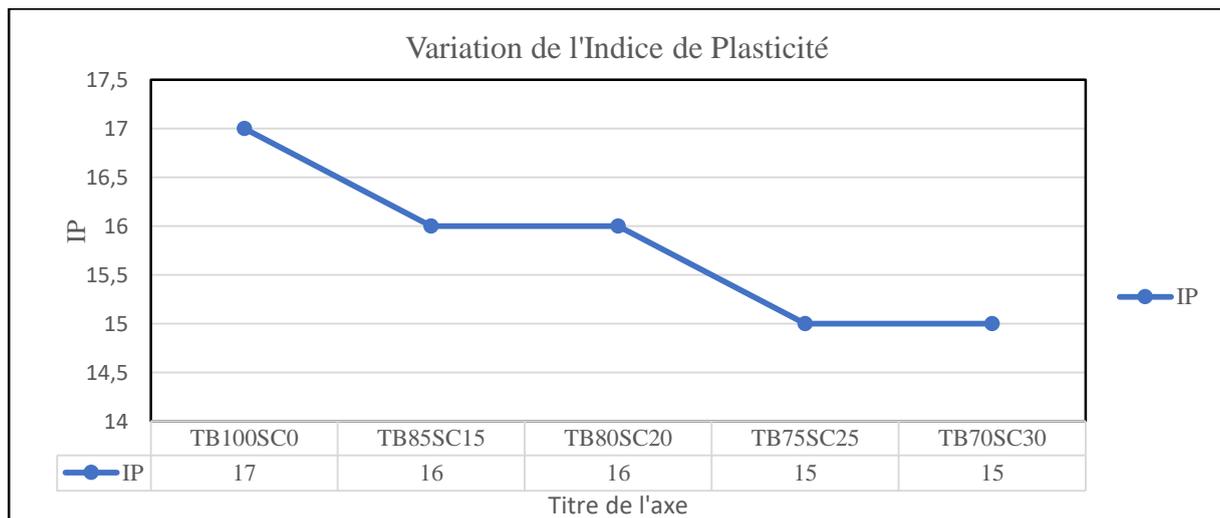


Figure 3.17 : Comportement de L'indice de plasticité de la Terre de barre et des différents mélanges étudiés.

Globalement l'apport de sable concassé a diminué substantiellement la plasticité de la terre de barre partant d'un indice plasticité de 17 à 15 pour le cas de notre terre de barre.

Pour amenuiser notre choix, voyons plus bas ce que nous offre les essais CBR.



Photo 3.7 : Essai de Limites d'Atterberg sur les divers mélanges.

3.6.5 Résultats du CBR

Les résultats des essais CBR se présentent comme sur la figure ci-dessous. On peut aisément remarquer que ces valeurs connaissent une évolution et passent de 22 KN (95%OPM) pour la valeur du CBR de la terre de barre, à 53 KN (95%OPM) pour le mélange à 30% et respectivement 45 à 69 KN pour le CBR à 100% de l'OPM.

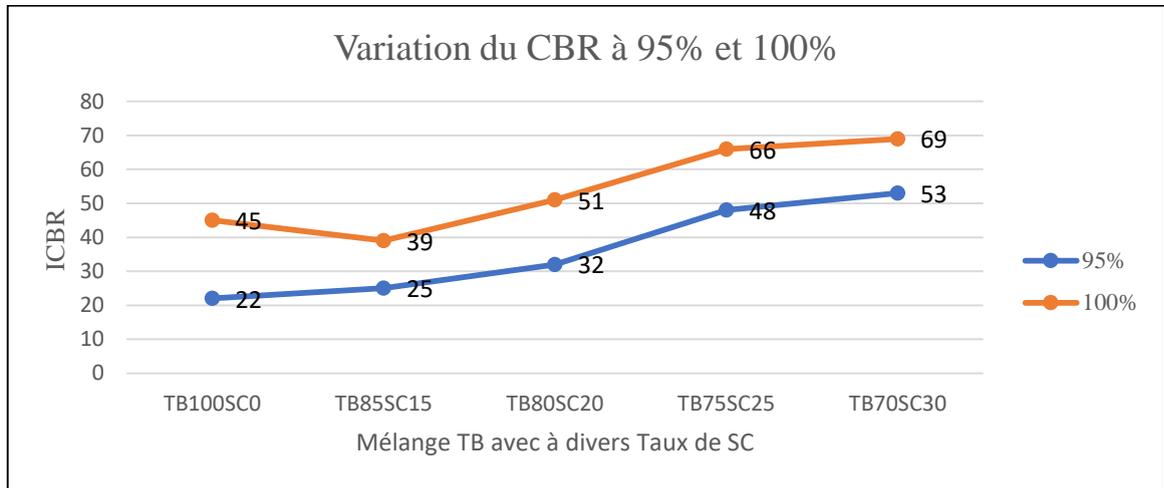


Figure 3.14 : Variation des Indices CBR à 95 et 100% OPM des différents taux de mélange et de la terre de barre.



Photo 3.8 : Essai CBR sur les divers mélanges.

3.6.6 Tableau récapitulatif des Résultats d'Essais d'identification

Les résultats obtenus sur les matériaux crus à l'état naturel et sur les mélanges constitués sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.17 : Tableau Récapitulatif des Résultats d'identification des matériaux crus et Mélanges à 15%, 20%, 25% et 30%. Comparés aux Exigences Couches de Forme et Fondation.

ESSAIS D'IDENTIFICATION COMPLÈTE SUR DIFFÉRENTS MATERIAUX								Exigences CCTP	
ESSAIS		TB100SC0	TB0SC100	TB85SC15	TB80SC20	TB75SC25	TB70SC30	FORME	FONDATION
Analyse Granulométrique (AG)	2 (Tamis en mm) %	96	53	91	90	86	85	SO	SO
	0,08 (Tamis en mm) %	50	16	40	37	33	30	< 35	< 25
Limites d'Atterberg (LA)	WL	44	Non mesurable	43	43	42	40	< 40	< 40
	IP	17	Non mesurable	16	16	15	15	< 25	< 20
Equivalent de sable SE	SE (%)	Non mesurable	57	Non mesurable	Non mesurable	Non mesurable	Non mesurable	SO	SO
Valeur au Bleu de Méthylène (VBS)	VBS (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	SO	SO
Matières Organiques (MO)	MO (%)	0,2	0,38	0,44	0,42	0,44	0,43	SO	SO
Optimum Proctor Modifié OPM	WOPM (%)	14,7	6,9	12,0	11,9	11,6	11,2	SO	SO
	Y _d (T/m ³)	1,88	2,15	1,97	1,98	1,98	2,00	≥ 1,80	≥ 1,80
Californian Bearing Ratio (CBR) Valeur ICBR	100% OPM	45	263	39	51	66	69	SO	SO
	95%OPM	22	242	25	32	48	53	> 20	> 30
	Gonfl. Linéaire	0,145	0,02	0,12	0,111	0,103	0,077	< 1	< 0,5
Classification	GTR	A2	B5	A2	A2	A2	A2	SO	SO
	Indice de Groupe (IG)	6		4	4	2	2	SO	SO

3.6.7 Essai de cisaillement direct (Essai mécanique)

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif f' et la cohésion effective c' , paramètres utilisés pour le dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette

L'essai consiste à (selon la norme NF P94-071-1):

- Consolider l'éprouvette de section s dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (contrainte $\sigma_n=N/s$)
- La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon.
- Cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- L'effort de cisaillement horizontal (T) est mesuré et la contrainte $t=T/s$ est calculée.

1. Sable concassé 0/5

Les résultats d'essai au cisaillement par la méthode directe obtenus sur le sable concassé 0/5 sont consignés par le Procès-verbal ci-dessous :

Tableau 3.18 : Résultats de contrainte et déformations sur le sable concassé de TAN.

Récapitulatif des résultats sur le sable concassé 0/5 de TAN									
W% initiale	W% finale	% < 80 μ	LL	IP	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	Vitesse (mm/min)	C_{uu} (Kpa)	φ_{uu} (dégrés)
3,92	10,59	16	-	-	20,61	19,84	1,5	1,21	30,70

ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

CNERTP	UU
---------------	-----------

Date de l'essai: 23/01/2024

Identification de l'échantillon	
Date et lieu de prélèvement	TAN
N° sondage	
Profondeur (m)	
Nature du sol	-

Point	1	2	3	4
Charge (kg)	18	36	72	144
Contrainte normale (kpa)	50,00	100,00	200,00	400,00
Contrainte de cisaillement (kPa)	27,50	54,72	134,44	233,06
Teneur en eau initiale (%)	3,94	3,99	3,80	3,96
Teneur en eau finale (%)	11,46	10,55	10,21	10,12

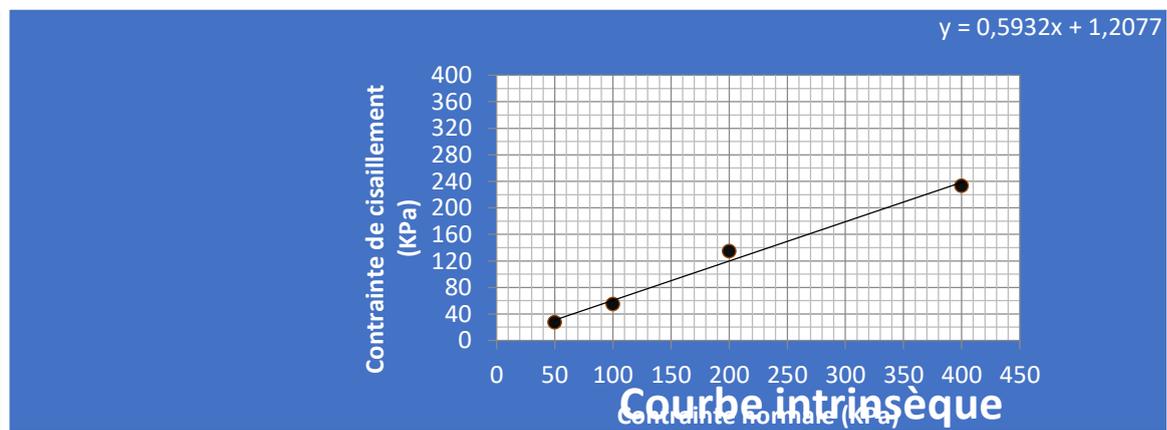
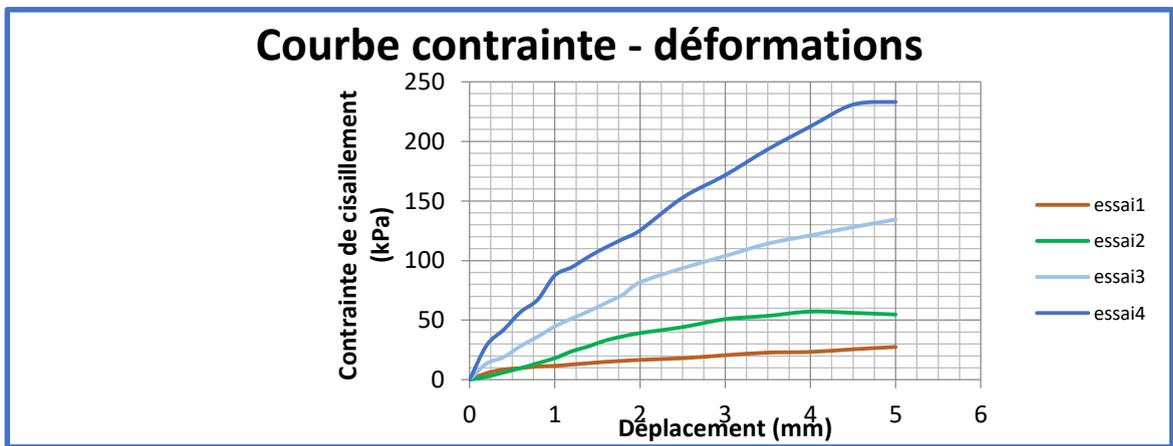


Figure 3.15 : Courbe Contrainte – Déformation de la terre de barre

2. Terre de barre de Sissinkpa

ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

CNERTP		UU		
Date de l'essai:		23/01/2024		
Identification de l'échantillon				
Date et lieu de prélèvement		Sissinkpa (Adjohoun)		
N° sondage				
Profondeur (m)				
Nature du sol		-		
Point	1	2	3	4
Charge (kg)	18	36	72	144
Contrainte normale (kpa)	50,00	100,00	200,00	400,00
Contrainte de cisaillement (kPa)	28,33	54,17	112,22	218,33
Teneur en eau initiale (%)	11,47	11,60	11,57	12,08
Teneur en eau finale (%)	21,03	20,98	19,57	18,14

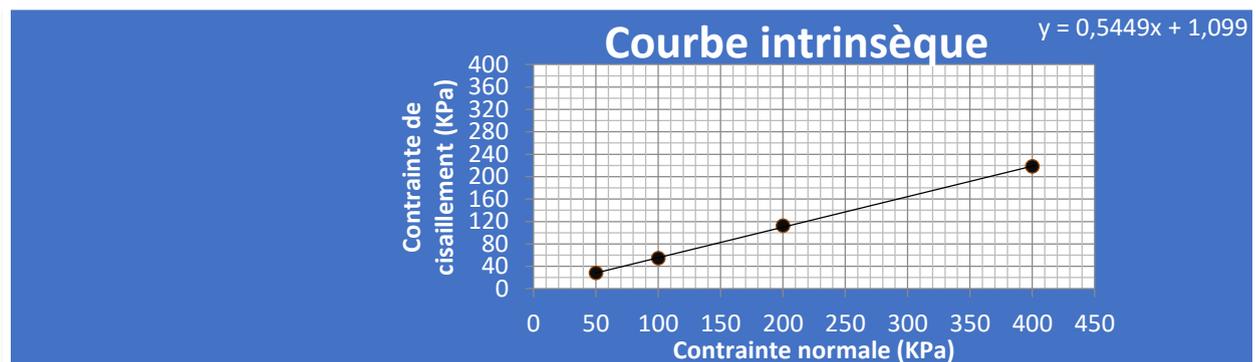
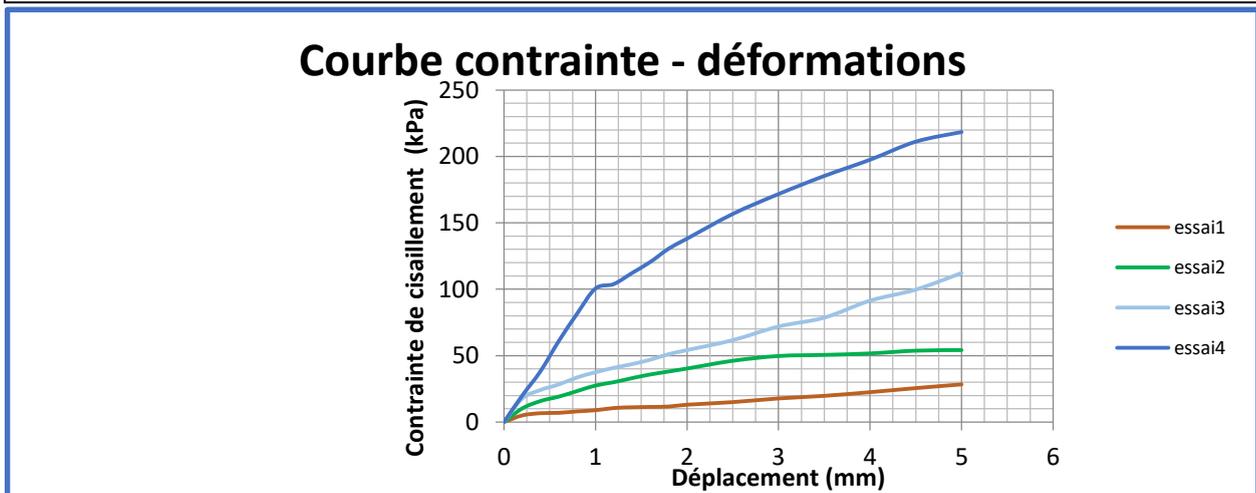


Figure 3.16 : Courbe Contrainte – Déformations du sable concassé par l'essai de cisaillement direct.

Tableau 3.19 : Résultats de contrainte et déformations de la terre de barre de Sissinkpa

Récapitulatif des résultats sur la terre de barre de Sissinkpa (ADJOHOUN)									
W% initiale	W% finale	% < 80 μ	LL	IP	γ_h (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	Vitesse (mm/min)	C _{uu} (Kpa)	ϕ_{uu} (dégrés)
11,68	19,93	50	42	22	20,52	18,37	1,5	1,1	28,6

3.6.8 Conclusion

Cette étude consiste à une substitution de la terre de barre une proportion respectivement de 15%, 20%, 25% et 30% par le sable concassé 0/5 correspondant. Les résultats de la caractérisation géotechnique répondant aux exigences des normes et règlements en construction routière se résumant comme suit :

Terre de barre à l'état naturel (TB100SC0) :

P80=50% ; IP= 17% ; VBS=0,1% ; Ds=1,88 t/m³ ; ICBR=22% ;

Terre de barre améliorée à 15% de sable concassé (TB85SC15) :

P80=40% ; IP= 16% ; VBS=0,1% ; Ds=1,97 t/m³ ; ICBR=25% ;

Terre de barre améliorée à 20% de sable concassé (TB80SC20) :

P80=37% ; IP= 16% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=32% ;

Terre de barre améliorée à 25% de sable concassé (TB75SC25) :

P80=33% ; IP= 15% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=48% ;

Terre de barre améliorée à 30% de sable concassé (TB70SC30) :

P80=30% ; IP= 15% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=53%.

Ces résultats comparés aux exigences du CEBTP 1984 amélioré 2019 et les exigences des prescriptions techniques du projet asphaltage (*Voir Tableau 3.17*), le mélange constitué de 75% de terre de barre et de 25% de sable concassé 0/5 (TB75SC25) peut être utilisé en couche de forme des chaussées souples.

3.6.9 Caractéristiques géotechniques du matériau (TB75SC25) avec les seuils du CEBTP 1984 révisé 2019.

Tableau 3.20 : Résultats nouveau matériau (TB75SC25) comparés aux Exigences du CCTP Projet Asphaltage PORTO NOVO

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs obtenues TB75SC25</i>	<i>Couche de forme</i>	<i>Couche de fondation</i>	<i>Couche de base</i>
<i>% de passant au tamis 80µm</i>	33	≤ 35,00	≤ 25,00	≤ 20,00
<i>Limite de liquidité (%)</i>	42	< 40,00	< 40,00	< 40,00
<i>Indice de plasticité (%)</i>	15	< 25,00	< 20,00	≤ 20,00
<i>Densité sèche OPM (t/m³)</i>	1,98	≥ 1,80	≥ 1,80 – 2,00	≥ 2,00
<i>Indice CBR à 95% OPM (MPa)</i>	48	> 20	> 30,00	≥ 60,00

Le nouveau matériau obtenu (TB75SC25) peut alors être utilisé aisément en couche de forme en remplacement du sable silteux et graveleux latéritiques.

En vue de son utilisation en couche fondation des chaussées souples, il serait important de changer la granulométrie du matériau améliorant.

Il serait idéal de calculer l'incidence financière générée par ce nouveau matériau à comparer au coût du sable silteux.

C'est ce que nous allons voir dans le sous chapitre 3.7 qui suit.

3.7 COMPARAISON FINANCIÈRE ENTRE L'UTILISATION DU TB75SC25 ET LE SILTEUX EN COUCHE DE FORME.

La mise en œuvre de notre matériau de substitution aura forcément un coût qu'il urge de connaître. La comparaison de ce coût avec la mise en œuvre du silteux en couche de forme nous permettra de voir lequel revient moins cher.

Pour cela nous allons prendre un tronçon de rue du Projet asphaltage Lot 15 A de Porto-Novo qui a servi de base pour notre étude. Dans notre cas nous avons choisi le tronçon allant du PK 1+500 au PK 1+800 ;

- Evaluer la procédure de mise en œuvre de la couche de forme avec le nouveau matériau TB75SC25.

- Faire une Première évaluation du montant de mise en œuvre d'une couche de forme en silteux sur la base des prix proposés par l'entreprise exécutante ;
- Faire une deuxième évaluation du montant de la mise en œuvre du matériau TB75SC25 sur la base de son bordereau de prix unitaires.
- Présenter comparer le montant des travaux des 2 propositions.

La rue retenue sera la rue 3B.

Long de 6km il est situé en plein cœur de Porto-Novo tout comme les autres rues. Sa largeur est variable et pour notre étude nous prenons le tronçon allant du PK 1+500 au PK 1+800 qui présente une largeur de 9m. Sa structure est composée de :

- 15 cm de couche de forme en Sable Silteux Cru
- 15 cm de couche de fondation Sable Silteux Amélioré au ciment
- 15 cm de GNT en couche de base
- 16 cm de GB en couche de liaison GB 0/20 et une couche de roulement en BB 0/14 de 6 cm.

Notre comparaison étant juste au niveau de la couche de forme nous n'allons pas intégrer le cout des autres matériaux du corps de la chaussée.

Procédure de réalisation de la litho stabilisation sur le terrain

Notons que pour la mise en place du silteux il faudra :

- Atteindre la cote de la couche de fondation
- Déblai de 15 cm en surplus pour atteindre la cote couche de forme
- Fourniture et mise en œuvre du silteux

Or pour la mise en œuvre de la TB75SC25 il faudra :

- Atteindre la cote de la couche de fondation
- Déblai de 4,5 cm en surplus représentant 30% de la hauteur de la couche de forme
- Fourniture du sable concassé suivi de la mise en œuvre de l'amélioration à la terre de barre.

3.7.1 Devis quantitatif et estimatif de la mise en œuvre du silteux et du matériau TB75SC25 sur le tronçon choisi.

Tableau 3.21 : Estimation de la mise en œuvre d'une couche de forme en silteux d'après les propositions de l'entreprise OFMAS sur le lot 15 A Asphaltage.

Mise en œuvre du Silteux

N° Prix	Désignation travaux	Unité	Dimensions tronçon			Qté	Prix Unit.	Montant trav.
			Epais.	large	Long			
302	Déblais en terrain meuble	m ³	0,15	9	300	405	2 500	1 012 500
306	Fourniture et mise en œuvre de Couche de forme en sable silteux	m ³	0,15	9	300	405	9 500	3 847 500
Montant Hors Taxe pour un linéaire de 300 mètres								4 860 000
Montant Hors Taxe pour au mètre linéaire (mL)								16 200 F

Mise en œuvre du TB75SC25

Tableau 3.22 : Estimation de la mise en œuvre d'une couche de forme en TB75SC25

N° Prix	Désignation travaux	Unité	Dimensions tronçon			Qté	Prix Unit.	Montant trav.
			Epais.	Larg.	Long.			
302	Déblais en terrain meuble	m ³	0,045	9	300	121,5	2 500	303 750
305	Apport en sable concassé 0/5	m ³	0,045	9	300	122	8 500	1 037 000
	Mise en œuvre (Malaxage et compactage)	m ³	0,045	9	300	121,5	22 000	2 673 000
Montant Hors Taxe pour un linéaire de 300 mètres								4 013 750
Montant Hors Taxe pour au mètre linéaire (mL)								13 379,17 F

A l'issue des estimations précédentes nous remarquons une différence de **2 820,83 F CFA** (Deux mille huit cent vingt francs CFA virgule quatre-vingt-trois). Ce qui équivaut à une réduction de **17,41%** par rapport au sable silteux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif étant de formuler un matériau routier par la technique de la Litho stabilisation de la terre de barre de Sissinkpa (ADJOHOUN) améliorée au sable granitique 0/5 de Tan (ZAGNANADO).

Cette étude consiste à une substitution de la terre de barre une proportion respectivement de 15%, 20%, 25% et 30% par le sable concassé 0/5 correspondant. Les résultats de la caractérisation géotechnique répondant aux exigences des normes et règlements en construction routière se résumant comme suit :

Terre de barre à l'état naturel (TB100SC0) :

P80=50% ; IP= 17% ; VBS=0,1% ; Ds=1,88 t/m³ ; ICBR=22% ;

Terre de barre améliorée à 15% de sable concassé (TB85SC15) :

P80=40% ; IP= 16% ; VBS=0,1% ; Ds=1,97 t/m³ ; ICBR=25% ;

Terre de barre améliorée à 20% de sable concassé (TB80SC20) :

P80=37% ; IP= 16% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=32% ;

Terre de barre améliorée à 25% de sable concassé (TB75SC25) :

P80=33% ; IP= 15% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=48% ;

Terre de barre améliorée à 30% de sable concassé (TB70SC30) :

P80=30% ; IP= 15% ; VBS=0,1% ; Ds=1,98 t/m³ ; ICBR=53%.

Ces résultats comparés aux exigences du CEBTP 1984 amélioré 2019, le mélange constitué de 75% de terre de barre et de 25% de sable concassé 0/5 (TB75SC25) peut être utilisé en couche de forme des chaussées souples.

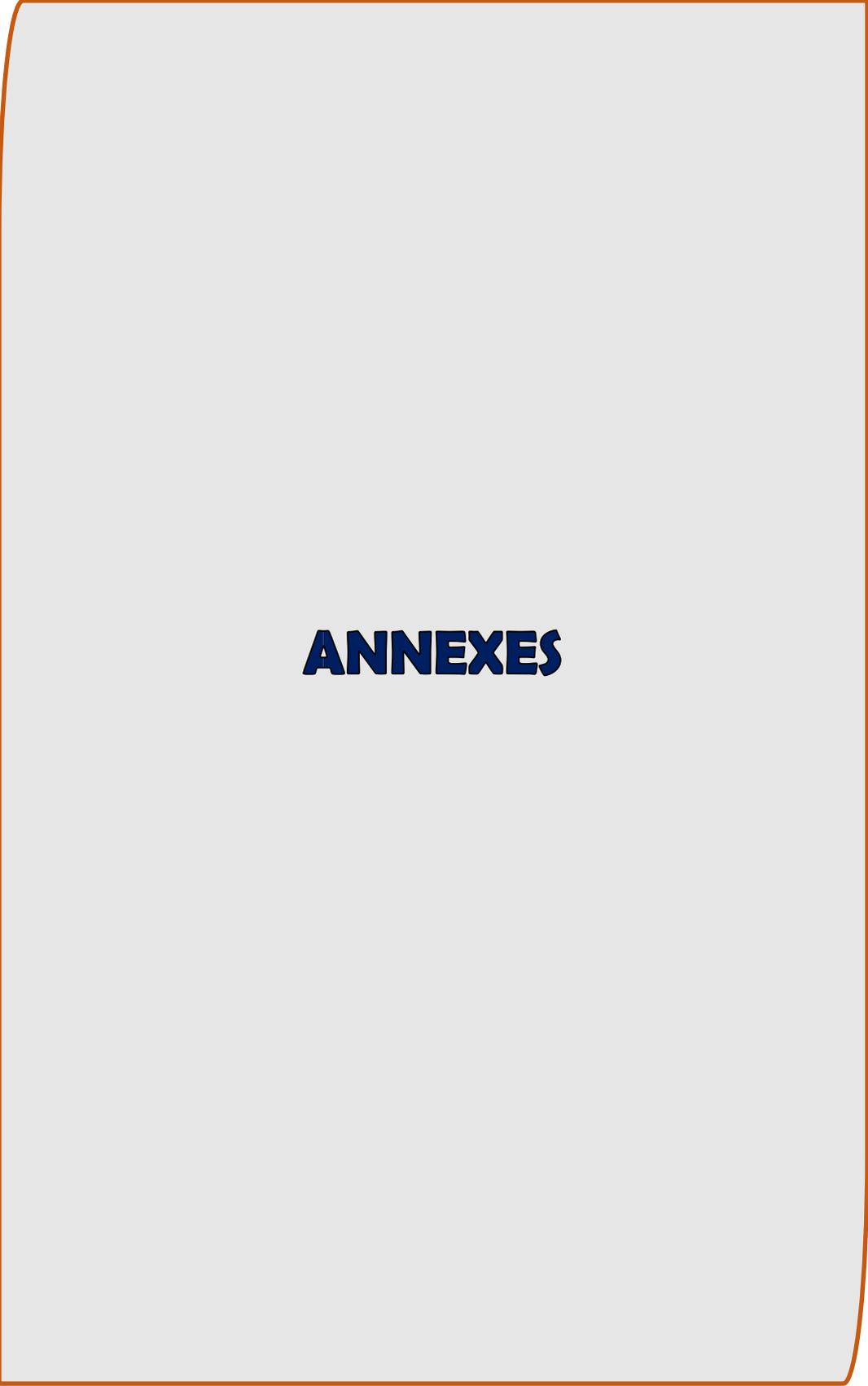
En vue de son utilisation en couche de fondation des chaussées souples, il serait important de changer la granulométrie de matériau améliorant. De plus, il sera envisagé une planche d'essai expérimentale pour la concrétisation de la recherche entreprise sur ces matériaux locaux. Ceci permettra d'obtenir le module in situ ainsi que le mode d'exécution du mélange.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, *Guide Pratique de Dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux CEBTP 1984 amélioré 2019.pdf*.
- 2 Guide Technique Réalisations des remblais et des couches de forme - Fascicule I et Fascicule II – SETRA / LCPC, 1992.
- 3 Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en remblais et couches de forme – SETRA / LCPC, 2000
- 4 Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en assises de chaussées – SETRA / LCPC, 2007
- 5 K. Y. TANKPINOU, V. S. GBAGUIDI, and C. ZEVOUNOU, “Mise au point pour assises de chaussées de matériaux élaborés (sable silteux et concasses),” vol. 15, no. 1, pp. 143–149, 2013.
- 6 C. M. HOUNTONKPO, “Constitution de matériaux routiers locaux : étude de la litho stabilisation de la terre de barre de Houéyogbé et de Calavi avec du concassé,” 2013.
- 7 C. ZANNOU, “Etude des possibilités d'utilisation des sables propres en construction routière : vers l'élaboration de nouveaux matériaux.” p. 168, 2013.
- 8 HOUNGBEDJI H. Marcia “ élaboration d'un composite à base de la terre de barre de zè amaigrie au sable de Misséssin en vue de son utilisation en couches d'assise de chaussées routières. ” p. 123, 2019.
- 9 Cours de géotechnique K. Y. TANKPINOU CAP/EPAC 2019-2020.
- 10 Cours de géotechnique routière OLODO David CAP/EPAC 2019-2020.
- 11 Thèse de Doctorat de M. Serge Kpomagbé DOSSOU sur le thème : Valorisation en technique routière de la grave latéritique de Avlamè en République du Bénin : Estimation expérimentale du module sécant.
- 12 “NF P94-056 Analyse granulométrique par tamisage mars 1996,” 2005.
- 13 “NF EN 933-8 Equivalent de sable août 1999,” p. 25, 2005.
- 14 “NF P94-051 Limites d'Atterberg mars 1993,” 2005.

15 “NF P94-093 Essai Proctor octobre 1999,” 2005.

16 “NF P94-078 Essai CBR mai 1997,” 2005.



ANNEXES

ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

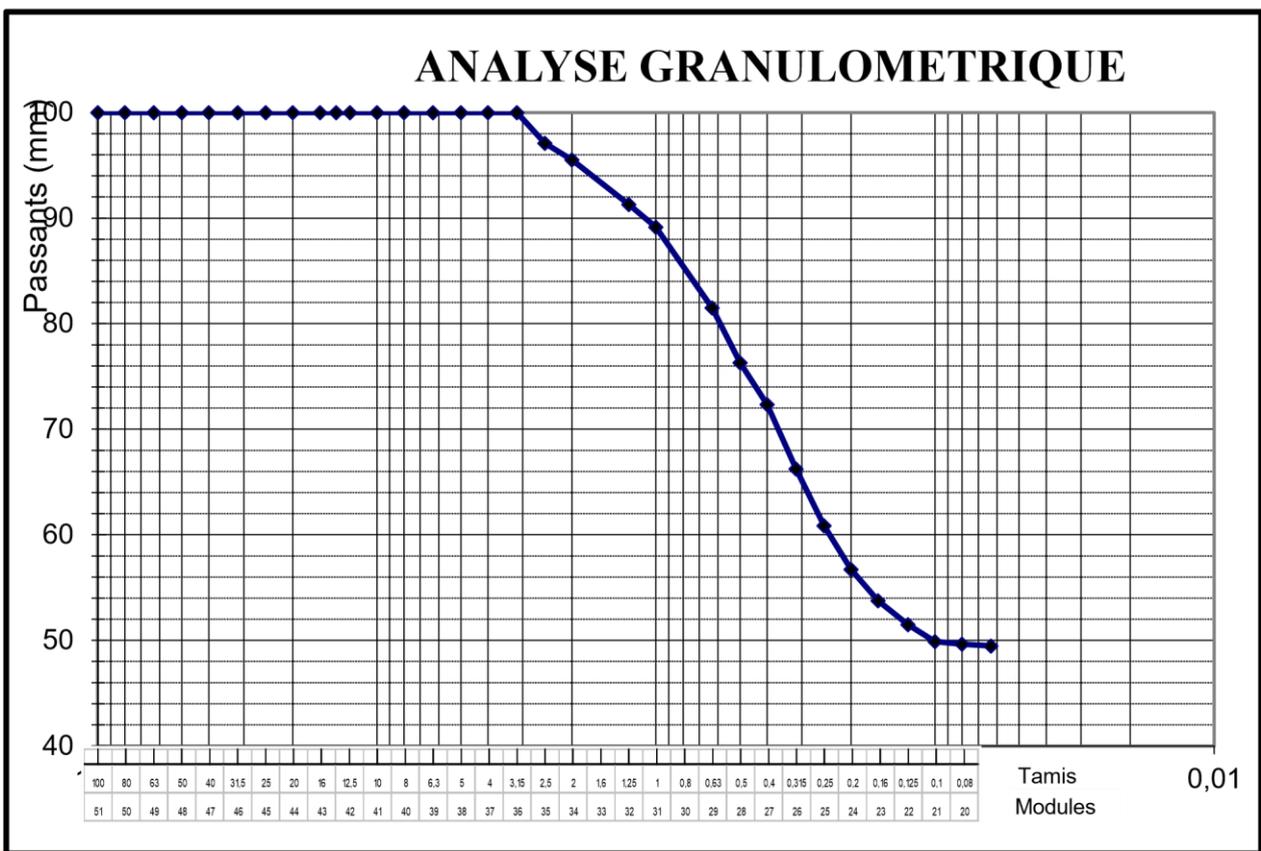
TERRE DE BARRE DE SISSINKPA

Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)

SYNTHESE DES RESULTATS

ECH N° / NATURE MATERIAU:	Terre de barre	DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023
CHANTIER:		DATE DE L'ESSAI:	29/08/2023
PROVENANCE:	Tas gerbé Base Zounvi	OPERATEUR:	ESAI E. A.

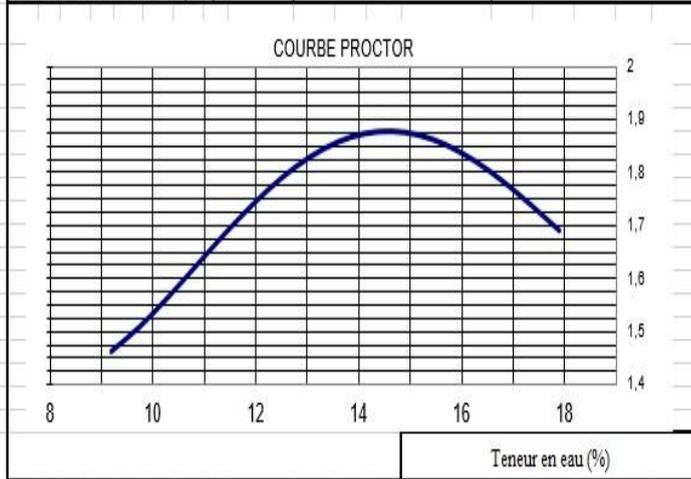
Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications	Certificat de Conformité
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	96%		
	% Passant Tamis 1,0 mm		89%		
	% Passant Tamis 0,500 mm		76%		
	% Passant Tamis 0,400 mm		72%		
	% Passant Tamis 0,250mm		61%		
	% Passant Tamis 0,200 mm		57%		
	% Passant Tamis 0,160 mm		54%		
	% Passant Tamis 0,125mm		51%		
	% Passant Tamis 0,08mm		50%		
	Fines		49%		
Limite d'Atterberg	LL	NF P 94-051	44		
	IP		17		
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,69		
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	14,7		
	Y _d OPM		1,877		
Indice CBR après 4jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	22		
	Indice de gonflement G(%)		0,15		



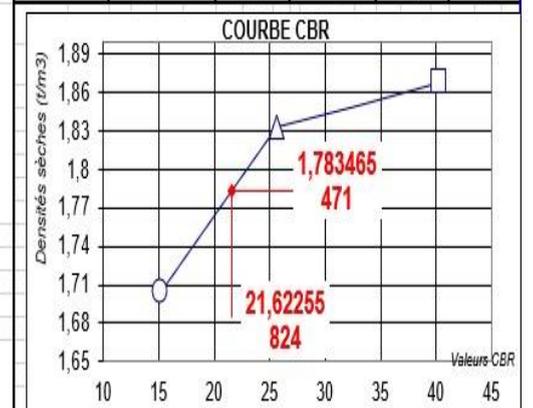
Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)

W.L.	LP.	CLASSIFICATION H.R.B	CLASSIFICATION GTR
44	17	A - 7 - 6(6)	

COMPACTAGE PROCTOR	
Proctor normal :	NON
Proctor modifié :	OUI
Essai	
Teneur en eau optimale (%):	14,7
Densité sèche maximale (t/m ³):	1,88



CALIFORNIAN BEARING RATIO (CBR)						
Immédiat	/	Densité sèche (t/m ³)	Teneur en eau (%)		Gonflement %	
			Moulage	Imbibition		
à 4 J. d'immersion		/				
Nombre de coups	□	56	1,867	100,0	105,0	0,00
	△	25	1,833	100,0	107,6	0,15
	○	10	1,705	100,0	122,6	0,00



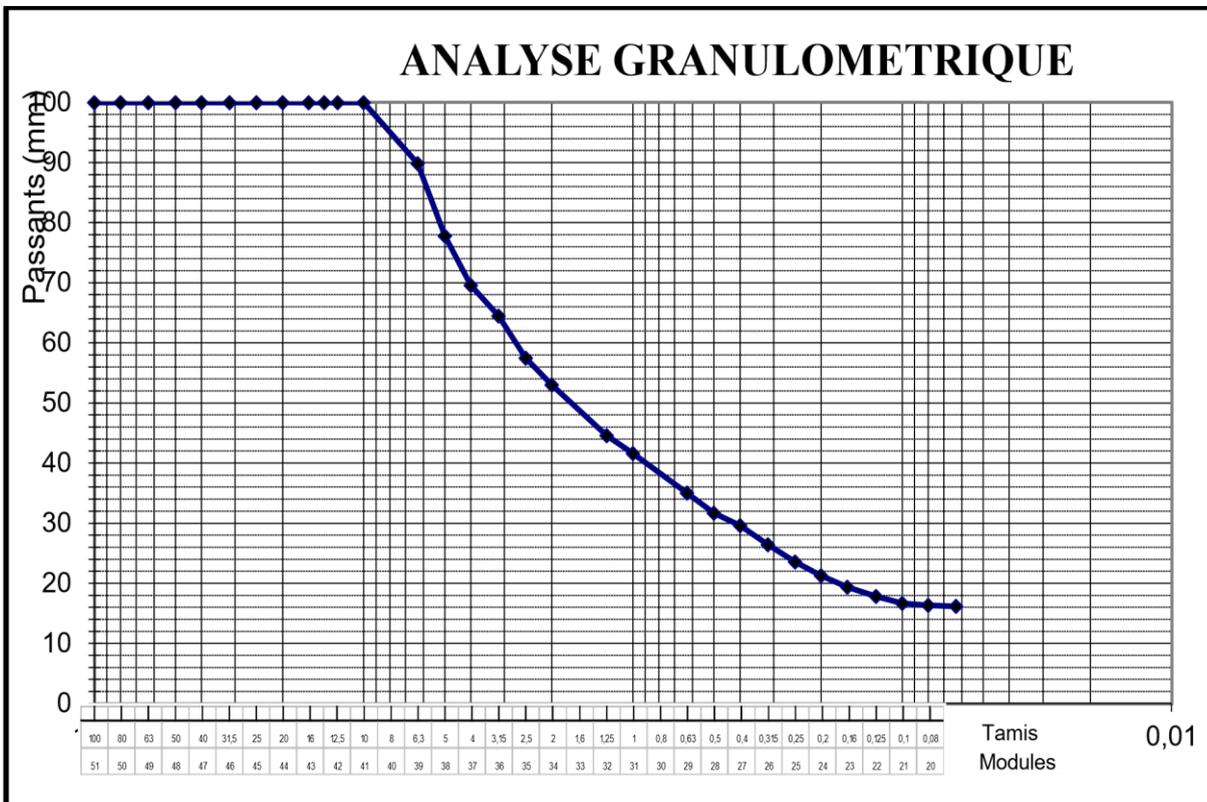
CBR à 95% OPM = 21,6		CBR
-----------------------------	--	-----

ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

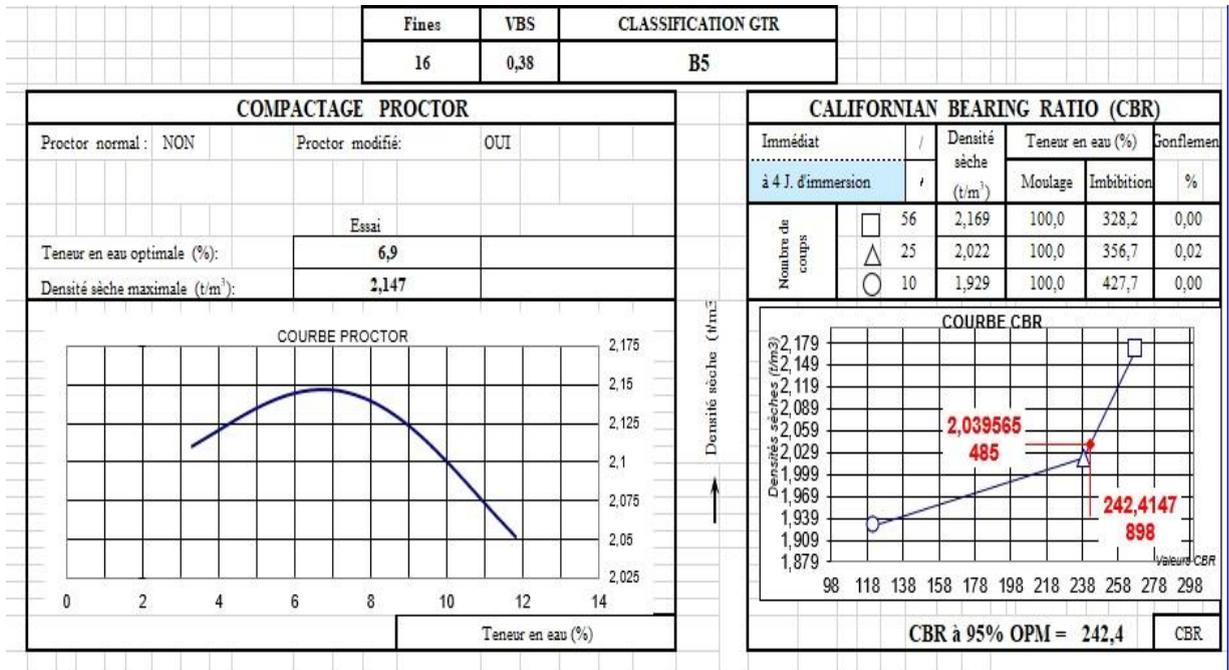
SABLE GRANITIQUE 0/5 DE TAN ZANGNANADO

*Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de
SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)*

SYNTHESE DES RESULTATS				
ECH N° / NATURE MATERIAU		Concassé 0/5	DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023
CHANTIER:			DATE DE L'ESSAI:	29/08/2023
PROVENANCE:		Carrière TAN	Quadrillage secondaire - Axe Horizontal (Valeur)	ESAIE A.
Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	53%	
	% Passant Tamis 1,0 mm		42%	
	% Passant Tamis 0,500 mm		32%	
	% Passant Tamis 0,400 mm		30%	
	% Passant Tamis 0,250mm		24%	
	% Passant Tamis 0,200 mm		21%	
	% Passant Tamis 0,160 mm		19%	
	% Passant Tamis 0,125mm		18%	
	% Passant Tamis 0,08mm		16%	
Fines		16%		
Equivalent de sable	ES	NF EN 933-8	57	
Valeur au bleu de Méthylène	VBs	NF EN 933-9	0,10	
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,38	
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	6,9	
	Y _d OPM		2,150	
Indice CBR après 4 jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	242	
	Indice de gonflement G(%)		0,02	



Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)



ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

**MELANGE DE 85% DE TERRE DE BARRE ET
DE 15% DE SABLE GRANITIQUE 0/5 DE TAN
ZANGNANADO**

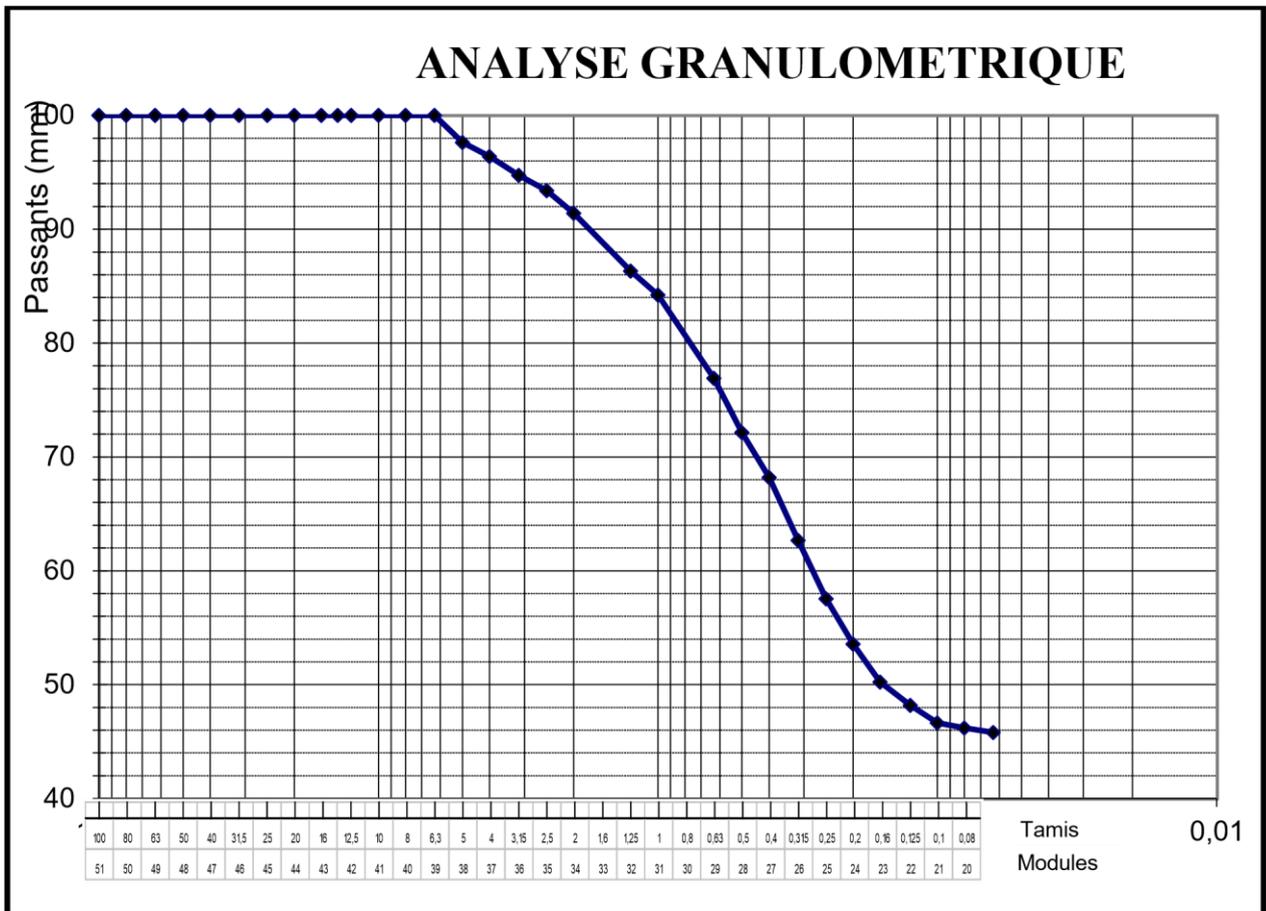
TB85SC15

Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)

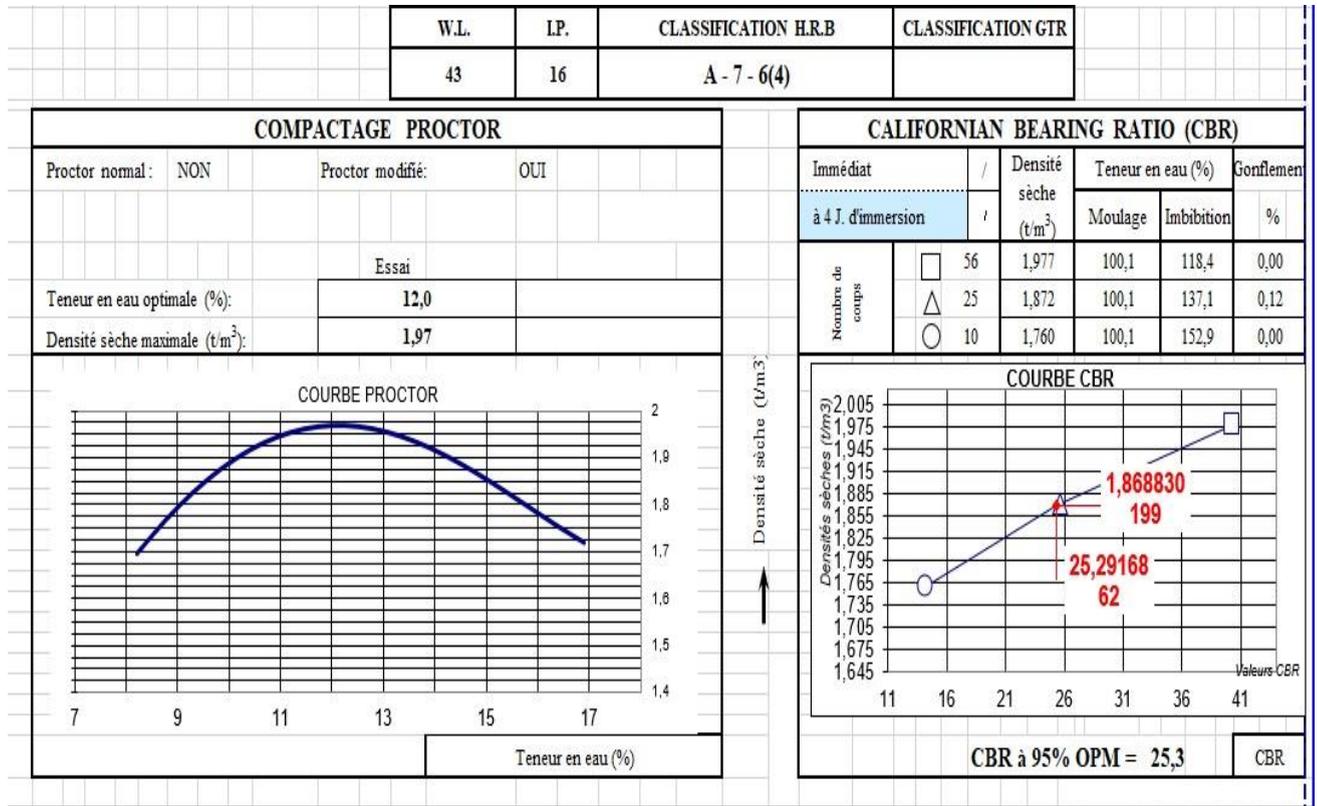
SYNTHESE DES RESULTATS

ECH N° / NATURE MATERIAU:		Mélange 85% Terre de barre + 15% Concassé 0/5	DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023
CHANTIER:			DATE DE L'ESSAI:	30/10/2023
PROVENANCE:			OPERATEUR:	ESAIÉ A.

Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications	Certificat de Conformité
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	91%		
	% Passant Tamis 1,0 mm		84%		
	% Passant Tamis 0,500 mm		72%		
	% Passant Tamis 0,400 mm		68%		
	% Passant Tamis 0,250mm		58%		
	% Passant Tamis 0,200 mm		54%		
	% Passant Tamis 0,160 mm		50%		
	% Passant Tamis 0,125mm		46%		
	% Passant Tamis 0,08mm		40%		
	Fines		40%		
Limite d'Atterberg	LL	NF P 94-051	43		
	IP		16		
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,51		
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	12,0		
	Y _d OPM		1,967		
Indice CBR après 4jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	25		
	Indice de gonflement G(%)		0,12		



Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)



ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

**MELANGE DE 80% DE TERRE DE BARRE ET
DE 20% DE SABLE GRANITIQUE 0/5 DE TAN**

ZANGNANADO

TB80S20

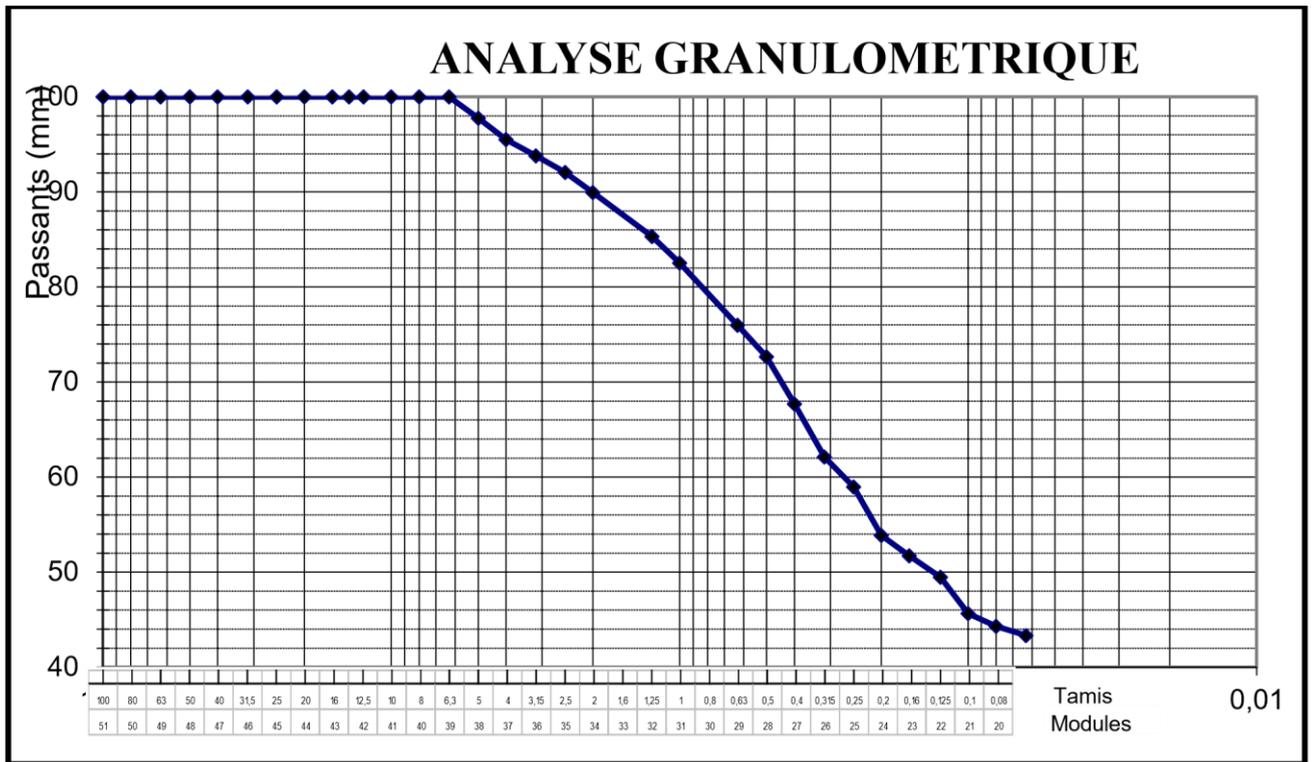


Laboratoire Central

**LABORATOIRE CENTRAL
SYNTHESE DES RESULTATS**

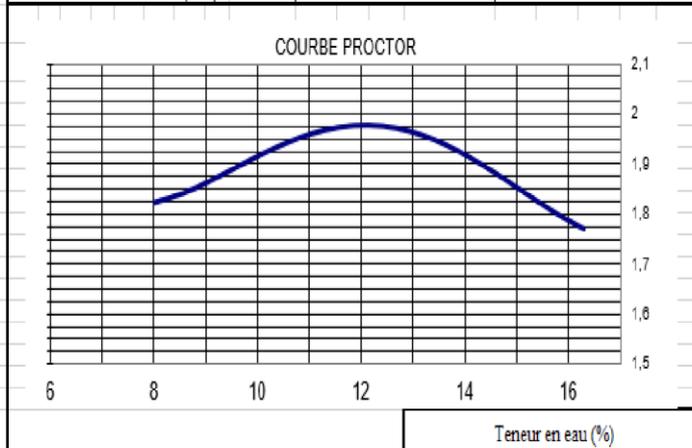
ECH N° / NATURE MATERIAU:	Mélange 80% Terre de barre + 20% Concassé 0/5	DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023
CHANTIER:		DATE DE L'ESSAI:	30/10/2023
PROVENANCE:		OPERATEUR:	ESAI E A.

Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications	Certificat de Conformité
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	90%		
	% Passant Tamis 1,0 mm		83%		
	% Passant Tamis 0,500 mm		73%		
	% Passant Tamis 0,400 mm		68%		
	% Passant Tamis 0,250mm		59%		
	% Passant Tamis 0,200 mm		54%		
	% Passant Tamis 0,160 mm		51%		
	% Passant Tamis 0,125mm		43%		
	% Passant Tamis 0,08mm		37%		
	Fines		37%		
Limite d'Atterberg	LL	NF P 94-051	43		
	IP		16		
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,51		
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	11,9		
	Y _d OPM		1,978		
Indice CBR après 4jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	32		
	Indice de gonflement G(%)		0,11		

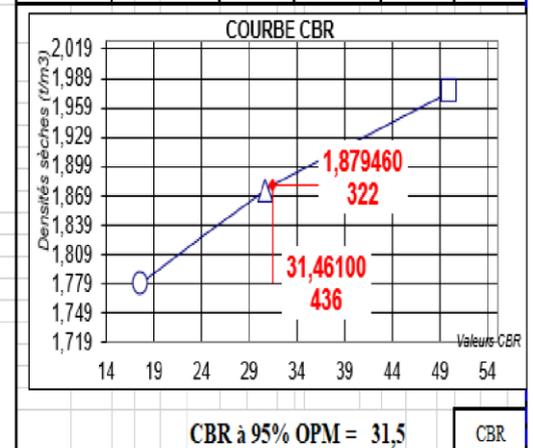


W.L.	IP.	CLASSIFICATION H.R.B	CLASSIFICATION GTR
43	16	A - 7 - 6(4)	

COMPACTAGE PROCTOR	
Proctor normal:	NON
Proctor modifié:	OUI
Essai	
Teneur en eau optimale (%):	11,9
Densité sèche maximale (t/m ³):	1,98



CALIFORNIAN BEARING RATIO (CBR)						
Immédiat	/	Densité sèche (t/m ³)	Teneur en eau (%)		Gonflement %	
			Moulage	Imbibition		
à 4 J. d'immersion		'				
Nombre de coups	□	56	1,976	100,1	119,5	0,00
	△	25	1,875	100,1	137,7	0,11
	○	10	1,779	100,1	152,6	0,00

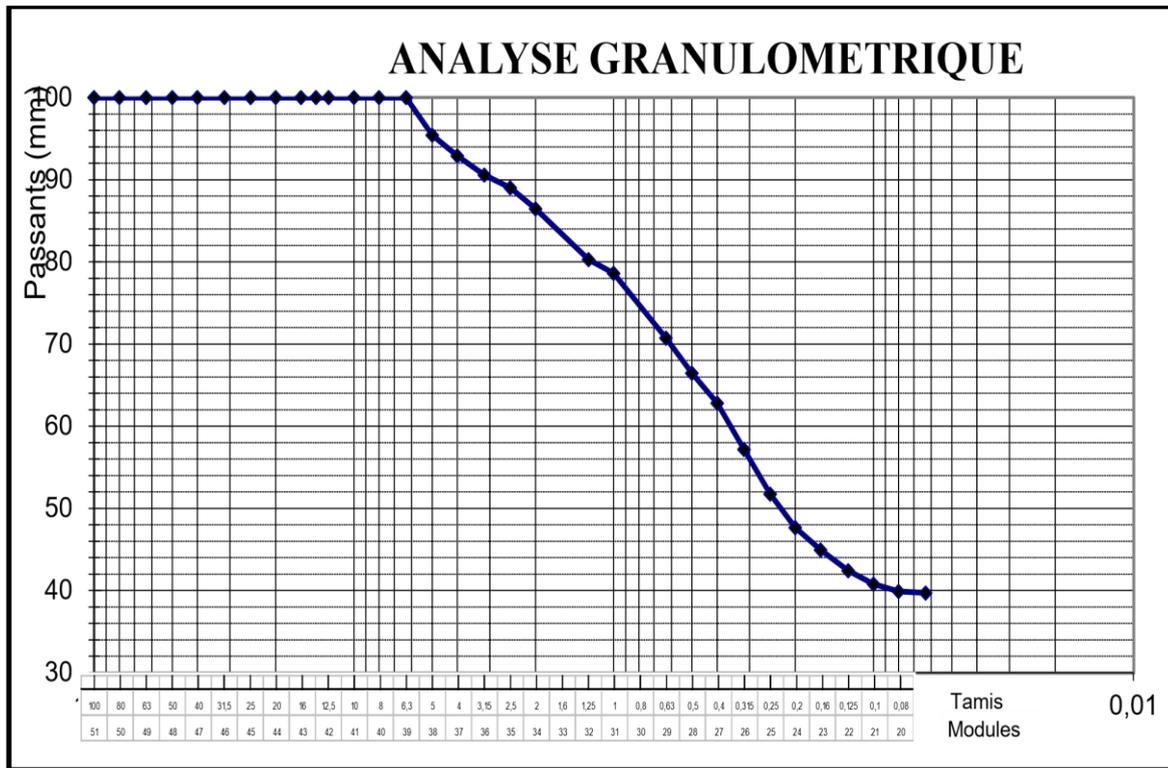


ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

**MELANGE DE 75% DE TERRE DE BARRE ET
DE 25% DE SABLE GRANITIQUE 0/5 DE TAN
ZANGNANADO
TB75SC25**

*Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de
SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)*

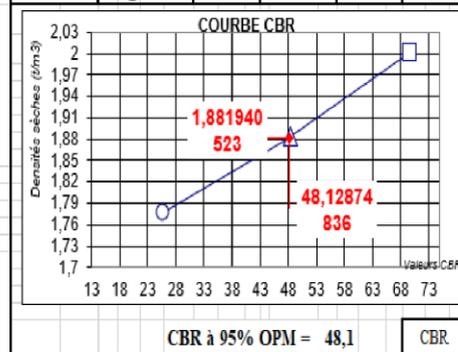
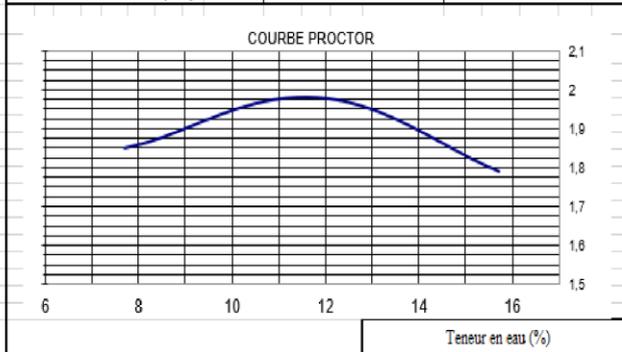
LABORATOIRE CENTRAL SYNTHESE DES RESULTATS					
ECH N° / NATURE MATERIA	Mélange 75% Terre de barre + 25% Concassé 0/5		DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023	
CHANTIER:			DATE DE L'ESSAI:	31/10/2023	
PROVENANCE:			OPERATEUR:	ESAIE A.	
Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications	Certificat de Conformité
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	86%		
	% Passant Tamis 1,0 mm		79%		
	% Passant Tamis 0,500 mm		66%		
	% Passant Tamis 0,400 mm		63%		
	% Passant Tamis 0,250mm		52%		
	% Passant Tamis 0,200 mm		48%		
	% Passant Tamis 0,160 mm		45%		
	% Passant Tamis 0,125mm		42%		
	% Passant Tamis 0,08mm		33%		
	Fines		33%		
Limite d'Atterberg	LL	NF P 94-051	42		
	IP		15		
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,44		
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	11,6		
	Y _d OPM		1,981		
Indice CBR après 4 jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	48		
	Indice de gonflement G(%)		0,10		



W.L.	I.P.	CLASSIFICATION H.R.B	CLASSIFICATION GTR
42	15	A - 7 - 6(2)	

COMPACTAGE PROCTOR	
Proctor normal :	NON
Proctor modifié :	OUI
Essai	
Teneur en eau optimale (%):	11,6
Densité sèche maximale (t/m ³):	1,98

CALIFORNIAN BEARING RATIO (CBR)						
Immédiat / à 4 J. d'immersion	/	Densité sèche (t/m ³)	Teneur en eau (%)		Gonflement %	
			Moulage	Imbibition		
Nombre de coups	□	56	2,002	100,1	105,1	0,00
	△	25	1,883	100,1	121,2	0,10
	○	10	1,778	100,1	138,6	0,00

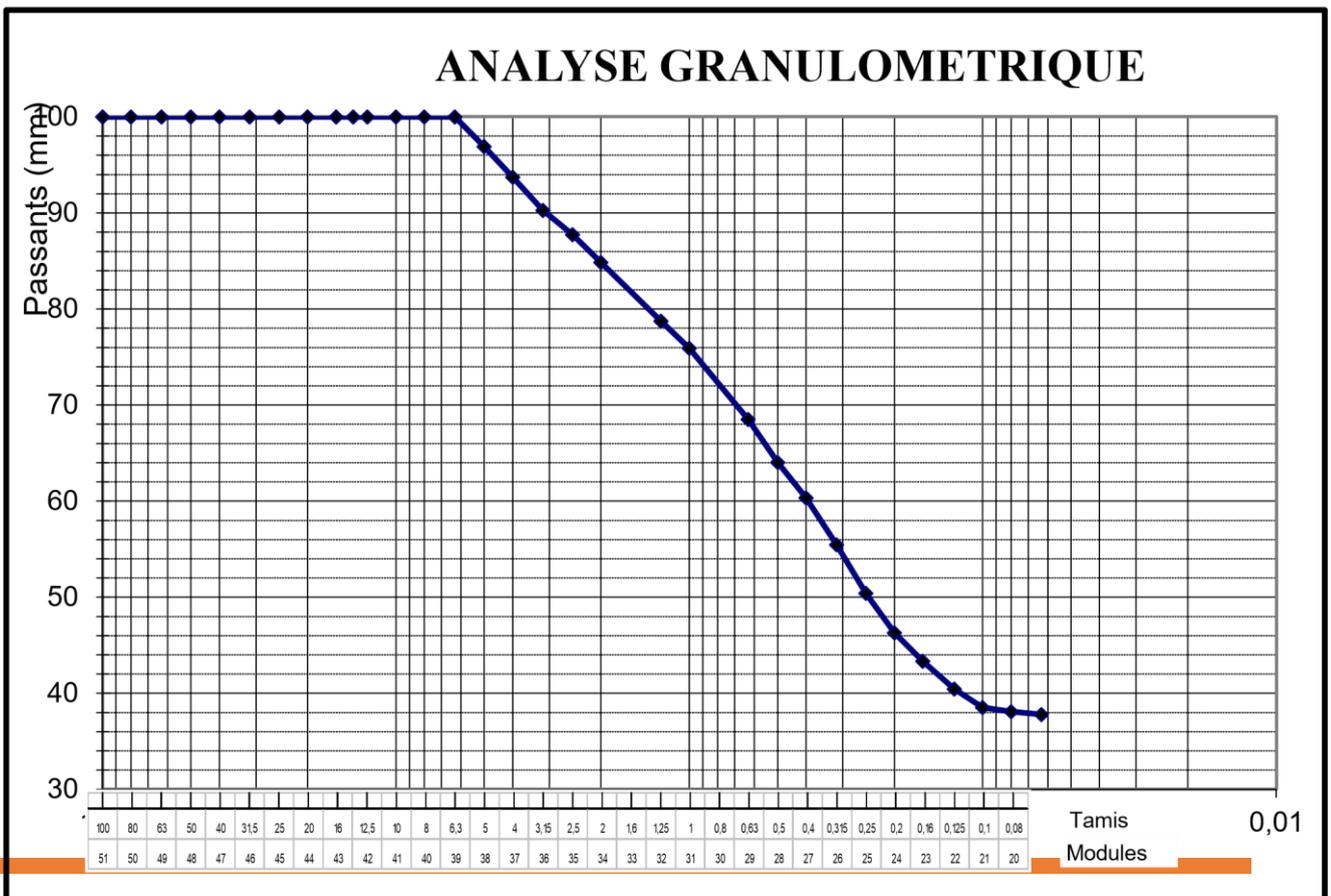


ANNEXE : ETUDES DES MATERIAUX

**MELANGE DE 70% DE TERRE DE BARRE ET
DE 30% DE SABLE GRANITIQUE 0/5 DE TAN
ZANGNANADO
TB70S30**

*Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de
SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)*

		LABORATOIRE CENTRAL SYNTHESE DES RESULTATS			
ECH N° / NATURE MATERIA	Mélange 70% Terre de barre + 30% Concassé 0/5			DATE DE PRELEVEMENT:	25/08/2023
CHANTIER:				DATE DE L'ESSAI:	31/10/2023
PROVENANCE:				OPERATEUR:	ESAIE A.
Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications	Certificat de Conformité
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 2,0 mm	NF EN ISO 17892-4	85%		
	% Passant Tamis 1,0 mm		76%		
	% Passant Tamis 0,500 mm		64%		
	% Passant Tamis 0,400 mm		60%		
	% Passant Tamis 0,250mm		50%		
	% Passant Tamis 0,200 mm		46%		
	% Passant Tamis 0,160 mm		43%		
	% Passant Tamis 0,125mm		39%		
	% Passant Tamis 0,08mm		30%		
Fines		30%			
Limite d'Atterberg	LL	NF P 94-051	40		
	IP		15		
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,43		
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	11,2		
	Y _d OPM		1,998		
Indice CBR après 4jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	53		
	Indice de gonflement G(%)		0,077		



Formulation d'un nouveau matériau routier par la technique de litho stabilisation de la terre de barre de SISSINKPA (ADJOHOUN) par ajout du sable granitique 0/5 de TAN (ZAGNANADO)

