

**AMELIORATION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-
MÉCANIQUES DE LA GRAVE LATÉRITIQUE PAR LE BIAIS
DE LA LITHO-STABILISATION EN VUE DE SON
UTILISATION EN COUCHE DE BASE : CAS DE L'AVENUE
MOGHO-NAABA À OUAGADOUGOU, BURKINA FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC
GRADE DE MASTER**

SPECIALITE : GENIE CIVIL – BTP

OPTION : ROUTES ET OUVRAGES D'ART

Présenté et soutenu publiquement le 22 Juillet 2025 par

IBRAHIM HALIL Aliou (20230353)

Directrice de mémoire : Dr Marie Therese Marame GOMIS/MBENGUE

Maître de stage : M. PARE Samuel Jonathan

Jury d'évaluation :

Président : Dr Malicki ZOROM

Membres et correcteurs : M. Ousséni MONE

M. Komi Jeannot N'TSOUKPOE

Promotion [2024/2025]

Dédicace

**Je dédie ce
modeste travail à
la famille Aliou à
Bertoua,
Cameroun.**

Remerciements

Au terme de notre travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Nos remerciements vont particulièrement à :

- Prof. Mahamadou KOÏTA, Directeur des Enseignements et des Affaires Académiques de l'Institut 2iE pour les efforts de professionnalisme envers notre formation ;
- Dr Césaire HEMA, chef de département de génie civil de l'Institut 2iE, pour son soutien dans le cadre de l'obtention de ce stage ;
- Ma Directrice de mémoire, Dr Marie Thérèse MBENGUE/GOMIS (enseignant-chercheur en génie civil à l'Institut 2iE), pour son accompagnement, la disponibilité dont elle a fait preuve, et surtout pour son sens de professionnalisme et de maîtrise du sujet auquel j'ai été confronté ;
- Tout le personnel de 2iE ;
- Monsieur Souleymane L. NANA, Directeur Général de ECW Sarl pour nous avoir accueilli au sein de son illustre entreprise ;
- Mon encadreur industriel Monsieur PARE Samuel Jonathan pour l'orientation, l'accompagnement, et les conseils durant tout le stage ;
- Madame ZOANGA Alizeta pour son accompagnement et ses conseils durant tout le stage ;
- M. Alain et Razak, pour leur guide et leurs différentes explications sur les essais réalisés dans le cadre de ces études ;
- Amir, Banda et Epiphane, pour leur guide sur le terrain ;
- Tout le personnel de ECW Sarl, et du laboratoire GEOTEC AFRIQUE, pour leur suivi lors de la réalisation des différentes études menées dans le cadre de la rédaction de ce mémoire ;
- Mes parents pour leur amour et soutien ;
- Mon grand frère et tuteur HISSEN Aliou pour tout son soutien ;
- Mes frères et sœurs pour leur soutien ;
- Tous mes camarades et amis qui de près ou de loin auraient participé à la réussite de ce travail, en particulier Soumahoro Al houssein, pour son implication et les efforts fournis lors de la rédaction de ce mémoire.

Résumé

Dans le cadre de l'amélioration des conditions de vie des populations et de la fluidité de la circulation en milieu urbain tout en assurant la sécurité des usagers, le gouvernement du Burkina Faso entrepris des travaux de réhabilitation de l'Avenue Mogho-naaba dans la ville de Ouagadougou. Ce projet exige en couche de base, un graveleux latéritique amélioré par ajout des concassés de granite. Dès lors, la présente étude a pour objectif de déterminer la proportion de concassés de granite idéale pour répondre aux exigences du projet. Cette étude se structure alors autour de deux axes principaux: la caractérisation du graveleux latéritique de l'emprunt de Yimdi et des concassés de granite de ECW carrière de Koubri, et la formulation à différentes proportions de concassés de granite, suivi d'une évaluation de leurs effets sur les propriétés physiques et mécaniques des sols latéritiques naturels. Ainsi, après caractérisation, nous avons substitué la latérite par les concassés dans les proportions de 10, 20 et 30% de la masse sèche. Ces mélanges ont été ensuite soumis à des essais géomécaniques. Les résultats montrent que le graveleux latéritique brut est une argile peu plastique contenant 19,1% de fines. Ils montrent aussi une amélioration significative de la portance du matériau. Ainsi, l'indice CBR à 98% de l'OPM passe de 94 pour la latérite à l'état naturel à 103, 148 et 172 à des ajouts respectifs de 10, 20 et 30% de concassés. Lors de la mise en œuvre, la formule à 20% de concassés de granite a finalement été retenue, car elle est celle qui répond le mieux aux exigences du projet et à celles du CEBTP.

Mots clés :

- ✓ Avenue Mogho Naaba
- ✓ Graveleux latéritique
- ✓ Concassés de granite
- ✓ Couche de base
- ✓ Litho-stabilisation
- ✓ Indice CBR

Abstract

As part of improving the living conditions of the population and the fluidity of traffic in urban areas while ensuring the safety of users, the government of Burkina Faso has undertaken rehabilitation work on Mogho-naaba Avenue in the city of Ouagadougou. This project requires a lateritic gravel base layer enhanced by the addition of crushed granite. Therefore, the present study aims to determine the ideal proportion of crushed granite to meet the project requirements. This study is then structured around two main axes: the characterization of the lateritic gravel from the Yimdi loan and the crushed granite from the ECW Koubri quarry, and the formulation at different proportions of crushed granite, followed by an evaluation of their effects on the physical and mechanical properties of natural lateritic soils. Thus, after characterization, we substituted laterite with crushed stone in the proportions of 10, 20 and 30% of the dry mass. These mixtures were then subjected to geomechanical tests. The results show that the raw lateritic gravel is a low-plastic clay containing 19.1% fines. They also show a significant improvement in the bearing capacity of the material. Thus, the CBR index at 98% of the OPM goes from 94 for laterite in its natural state to 103, 148 and 172 with respective additions of 10, 20 and 30% of crushed granite. During implementation, the formula with 20% crushed granite was finally chosen, as it is the one that best meets the requirements of the project and those of the CEBTP.

Key words:

- ✓ **Avenue Mogho Naaba**
- ✓ **Lateritic gravel**
- ✓ **Granite crushed stone**
- ✓ **Base course**
- ✓ **Litho-stabilization**
- ✓ **CBR index**

Abréviations et sigles

2iE	:	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AG	:	Analyse Granulométrique
BP	:	Boite Postale
CBR	:	Californian Bearing Ratio
CEBTP	:	Centre d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
CCTP	:	Cahier des Clauses Techniques Particulières
CG	:	Concassés de Granite
ECW	:	Entreprises de Construction Woumtaba
GAL	:	Graveleux Argileuse Latéritique
GNT	:	Grave Non Traitée
GTR	:	Guide des Terrassements Routiers
HRB	:	Highway Research Board
I.CBR	:	Indice CBR
IP	:	Indice de Plasticité
ISTED	:	International Seminar on Teacher Training and Education
LA	:	Los Angeles
LCPC	:	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL	:	Limite de Liquidité
LP	:	Limite de Plasticité
NF	:	Norme Française
OPM	:	Optimum Proctor Modifié
SARL	:	Société A Responsabilité Limitée

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Abréviations et sigles	v
Table des matières	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Présentation de la structure d'accueil et du projet.....	3
Introduction	3
I- Présentation de la structure d'accueil.....	3
I-1- Historique et secteur d'activité de l'entreprise	3
I-2-Adresse complète de l'entreprise.....	3
I-3- Organigramme hiérarchique	4
II- Présentation du projet.....	4
II-1- Présentation du cadre de l'étude.....	4
II-2- Localisation de la zone du projet.....	6
II-3-1- Avenue Yennenga	7
III-3-2- Avenue Mogho	7
Conclusion.....	9
Chapitre 2 Revue bibliographique.....	10
Introduction	10
I- Généralités sur les chaussées	10
I-1- Définition.....	10

I-2- Structure d'une chaussée	10
I-3- Types de chaussées	11
II- Généralités sur les latérites.....	12
II-1- Définition et types de latérites.....	12
II-2- Les classifications usuelles.....	12
II-3- Quelques caractéristiques physico-mécaniques des matériaux latéritiques	13
II-4- Latérite dans la construction routière	15
III- Techniques d'amélioration et de traitement des sols.....	15
III-1- Amélioration par ajout du ciment	15
III-2- Amélioration par la litho-stabilisation	16
Conclusion.....	19
Chapitre 3 Matériels et Méthodes	20
Introduction	20
I- Méthodologie de l'étude	20
II- Essais d'identification	21
II-1- Echantillonnage.....	21
II-2- Analyse Granulométrique par tamisage	21
II-3- Limites d'Atterberg	22
II-4- Coefficient d'Aplatissement.....	24
III- Essais mécaniques	25
III-1- Proctor modifié	25
III-2- Essai CBR	26
III-3- Los Angeles.....	27
Conclusion.....	28
Chapitre 4 Résultats, Interprétations et Discussions	29
Introduction	29
I- Caractérisation des matériaux crus provenant des carrières	29

I-1- Caractérisation du graveleux latéritique cru	29
I-1-1- Analyse granulométrique par tamisage.....	29
I-1-2- Limites d’Atterberg	30
I-1-3- Proctor modifié	31
I-1-4- CBR	32
I-1-5- Synthèse des résultats d’identification de la latérite crue.....	32
I-2- Caractérisation des concassés de granite	33
I-2-1- Analyse granulométrique	33
I-2-2- Coefficient d’aplatissement	34
I-2-3- Los Angeles	34
I-2-4- Synthèse des résultats d’identification des concassés de granite.....	35
II- Caractérisation des mélanges de la grave latéritique et des concassés de granite (litho-stabilisation)	35
II-1- Analyse granulométrique par tamisage	35
II-2- Limites d’Atterberg	37
II-3- Proctor Modifié	37
II-4- CBR.....	38
II-5- Synthèse des résultats obtenus et choix de la formule adéquate	40
III- Mise en œuvre de la couche de base litho-stabilisée sur l’avenue Mogho Naaba	41
III-1- Suivi d’exécution	41
III-2- Contrôle de la conformité	43
III-2-1- Pendant la mise en œuvre.....	43
III-2-2- Après la mise en œuvre	44
Conclusion.....	46
Conclusion générale	47
Perspectives et Recommandations	48
Références	49

Liste des figures

Figure 1: Organigramme hiérarchique de l'entreprise	4
Figure 2: Zone d'étude et tronçon du projet.....	6
Figure 3: Structure de la chaussée sur l'avenue Yennenga	7
Figure 4: Structure de la chaussée sur l'avenue Mogho.....	8
Figure 5: Différentes couches d'une chaussée routière.....	11
Figure 6: Schéma synoptique du travail à effectuer	20
Figure 7: Echantillonnage par quartage des matériaux	21
Figure 8: Balance et tamis pour l'analyse granulométrique par tamisage	22
Figure 9: Représentation des limites d'Atterberg (NF P 94-051, 1993)	23
Figure 10: Appareil de casagrande pour la limite de liquidité	23
Figure 11: Appareil de casagrande pour la limite de liquidité.....	23
Figure 12: Grille pour l'essai d'aplatissement	24
Figure 13: Moule Proctor et Dame Proctor	25
Figure 14: Moule CBR et presse CBR	26
Figure 15: Boulets et appareil pour l'essai Los Angeles	27
Figure 16: Courbe granulométrique des graveleux latéritiques crus insérée dans le fuseau du CEBTP pour les GAL en couche de base.....	29
Figure 17: Limite de liquidité de la latérite crue	30
Figure 18: Abaque de Casagrande pour les limites d'Atterberg	31
Figure 19: Proctor modifié du graveleux latéritique cru	31
Figure 20: Indices CBR du graveleux latéritique cru.....	32
Figure 21: Courbe granulométrique des concassés de granite	33
Figure 22: Courbes granulométriques des différents mélanges	35
Figure 23: Limites d'Atterberg des différents mélanges.....	37
Figure 24: Teneurs en eau optimales des mélanges.....	38
Figure 25: Densités sèches optimales des mélanges	38
Figure 26: Paramètres CBR du mélange à 20% de concassés de granite.....	39
Figure 27: Etalement de la grave latéritique crue.....	41
Figure 28: Etalement des concassés de granite sur la grave latéritique crue	41

Figure 29: Humidification du mélange par une citerne à eau	42
Figure 30: Scarification du mélange par le scarificateur de la niveleuse.....	42
Figure 31: Couche de base après compactage.....	43
Figure 32:l'essai au densitomètre à membrane	44
Figure 33:Mesure de la déflexion à l'aide de la poutre de Benkelman	45

Liste des tableaux

Tableau 1: Adresse complète de l'entreprise	3
Tableau 2: Caractéristiques des GAL de Saaba (Mbengue, 2023).....	17
Tableau 3: Caractéristiques des GAL de Kamboinsin (Mbengue, 2023).....	17
Tableau 4: Quelques paramètres granulométriques de la latérite crue	29
Tableau 5: Limites d'Atterberg du graveleux latéritique cru	30
Tableau 6: Résultats d'identification de la latérite crue	33
Tableau 7: Paramètres granulométriques des concassés de granite	33
Tableau 8: Coefficient d'aplatissement des concassés de granite	34
Tableau 9: Coefficient Los Angeles des concassés de granite	34
Tableau 10: Résultats d'identification des concassés de granite.....	35
Tableau 11: Quelques paramètres granulométriques des mélanges	36
Tableau 12: Paramètres CBR des mélanges	39
Tableau 13: Synthèse des résultats obtenus.....	40
Tableau 14: Paramètres physiques et mécaniques après la mise en œuvre	44

Introduction générale

L'urbanisation rapide et le développement des infrastructures de transport dans les pays en voie de développement requiert une grande quantité de matériaux de bonne qualité pour les couches de chaussées, afin de répondre parfaitement aux attentes de leurs utilisateurs. Parmi les ressources en matériaux disponibles, les sols latéritiques sont plus prépondérants dans les régions tropicales. Au Burkina Faso, ces sols occupant près des 2/3 du territoire (Wyss & Sauret, 2007), sont faciles à extraire, ont un coût d'exploitation relativement faible et se situent souvent à proximité des infrastructures à construire.

Cependant, avec l'évolution des besoins, la prise en compte des contraintes environnementales et la rareté des graveleux latéritiques de bonne qualité, les sols latéritiques fins sont de plus en plus employés dans divers secteurs du génie civil (Mesbah et al. 1999; Ouattara 2021; De Medina et al. 2006). Toutefois, ces sols sont souvent considérés comme des sols « problématiques » (Gidigas, 1976). Cette situation a amené les professionnels du domaine à explorer des solutions pour renforcer les matériaux traditionnellement utilisés en couches d'assises. Parmi ces solutions figure la technique d'amélioration par ajout de ciment, et celle de la litho-stabilisation, qui consiste à renforcer la latérite avec du concassé de granite, une méthode proposée dans les années 1980 par (Lompo, 1980) du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) du Burkina Faso.

Fort de ces constats, notre étude s'inscrit dans la dynamique d'une amélioration des propriétés des sols latéritiques de la zone d'emprunt de Yimdi. Concrètement, il s'agira de déterminer la proportion de concassés de granite idéale pour répondre aux exigences du projet.

Plus spécifiquement, l'étude vise à :

- ✓ Caractériser les sols latéritiques de la zone d'emprunt de Yimdi, par le biais d'essais physico-mécaniques ;
- ✓ Caractériser les granulats de granites concassés provenant de ECW carrière de Koubri, par le biais d'essais physico-mécaniques ;
- ✓ Proposer des formulations par ajouts de concassés de granite, et évaluer les effets de ces ajouts sur les propriétés physiques et mécaniques des sols latéritiques du site d'emprunt ;
- ✓ Contrôler in situ la couche de base litho-stabilisée et vérifier que les résultats sur le terrain sont en conformité avec ceux obtenus en laboratoire.

Cette étude se focalisera sur de quatre chapitres.

Le premier chapitre s'intéresse à la présentation de la structure d'accueil et des spécifications techniques des travaux à réaliser.

Le deuxième chapitre s'intéresse à une revue bibliographique sur les structures de la chaussée routière et les généralités sur la latérite. Ce chapitre s'achève par une présentation des méthodes d'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des sols. Un accent a été porté sur l'amélioration par ajout des concassés de granite (litho-stabilisation), car elle est la moins polluante et la plus utilisée au Burkina Faso.

Le troisième chapitre quant à lui nous présente les différents essais d'identification et essais mécaniques effectués dans le cadre de cette étude.

Le quatrième chapitre s'articule autour des résultats obtenus dans le cadre de nos investigations, et leurs interprétations, suite à l'ajout de 10%, 20% et 30% de concassés de granite à la latérite crue.

Le mémoire se termine par une conclusion, des recommandations, une synthèse bibliographique et des annexes fournissant des détails sur les données analysées.

Chapitre 1

Présentation de la structure d'accueil et du projet

Introduction

Dans ce chapitre, la structure d'accueil et le projet à réaliser seront présentés. En commençant par un aperçu historique de l'entreprise, suivi du cadre et des objectifs du projet. Elle s'achèvera par une présentation des spécifications techniques du projet, afin d'éclairer ses aspects pratiques.

I- Présentation de la structure d'accueil

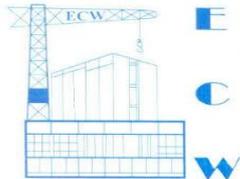
I-1- Historique et secteur d'activité de l'entreprise

Créée en 1990 avec un capital de 100 millions de FCFA, la Société des Entreprises de Construction Woumtaba (ECW Sarl) est une entreprise de construction évoluant dans le domaine du Bâtiment tout corps d'État, des Travaux de génie civil et rural, des Ouvrages d'Art, et de l'Aménagement hydraulique. ECW Sarl est enregistrée sous le numéro BF BDG 216 M 064 du Registre du Commerce Burkinabè, et immatriculée sous le numéro Identifiant Financier Unique (IFU) 00020915N.

I-2-Adresse complète de l'entreprise

Le tableau 1 nous présente l'adresse complète de la structure d'accueil.

Tableau 1: Adresse complète de l'entreprise

Dénomination	Société des Entreprises de Construction Woumtaba
Sigle	ECW
Statut	SARL (Société A Responsabilité Limitée)
Sièges	<ul style="list-style-type: none"> • Set. 29 – Parcelle 02 Section 114. Lot 14, Rue ZAD (Ouagadougou) • Secteur n° 7 (Koudougou)
Boite Postale	<ul style="list-style-type: none"> • 11 BP 1264 Ouagadougou 11 • B.P. 170 Koudougou
Téléphone	<ul style="list-style-type: none"> • +226 25 41 48 31 (Ouagadougou) • +226 25 44 06 16 (Koudougou)
E-mail	ecw_sarl@yahoo.fr
Logo	

I-3- Organigramme hiérarchique

La figure 1 présente l'organigramme hiérarchique de l'entreprise :

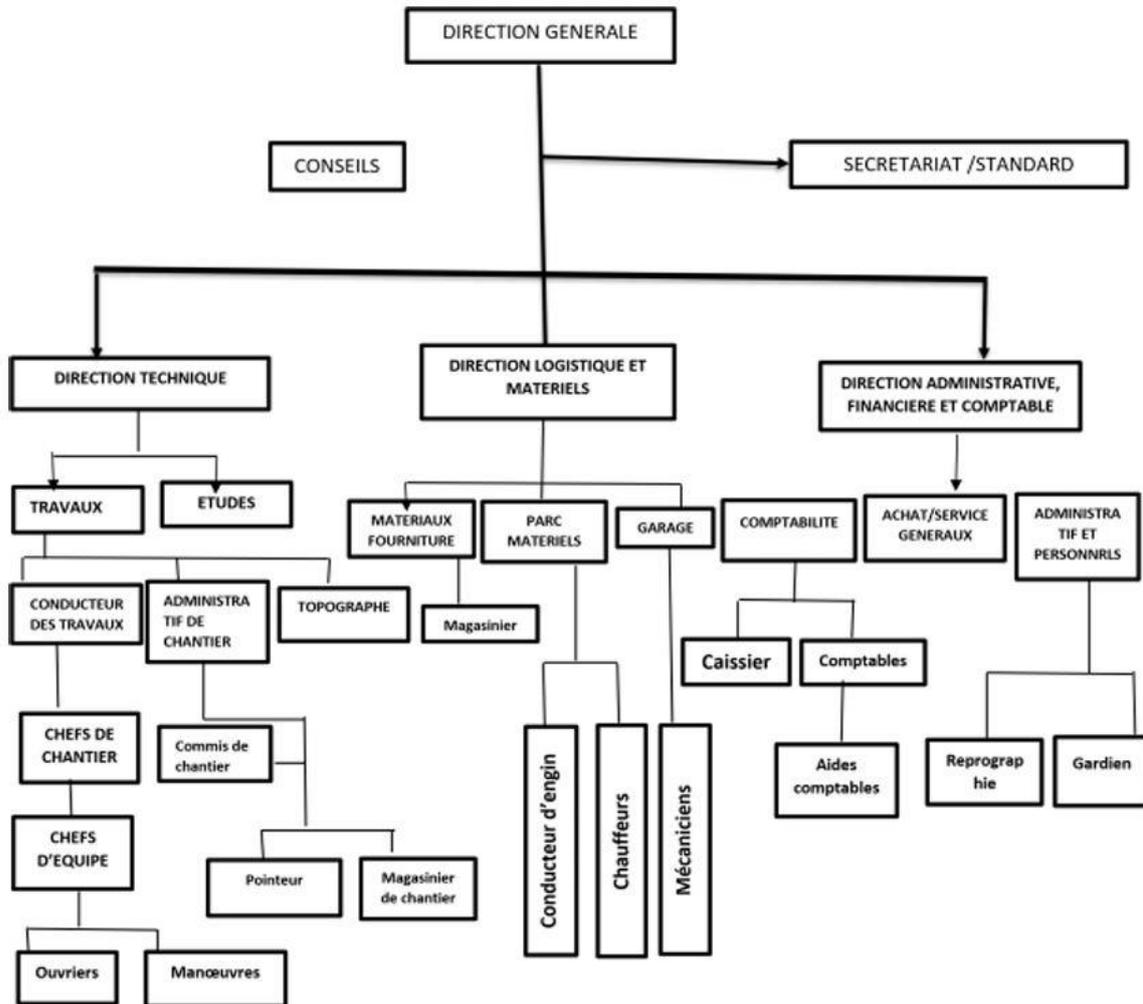


Figure 1: Organigramme hiérarchique de l'entreprise

II- Présentation du projet

II-1- Présentation du cadre de l'étude

Dans le cadre de l'amélioration des conditions de vie des populations et de la fluidité de la circulation en milieu urbain tout en assurant la sécurité des usagers, le gouvernement du Burkina Faso entreprend des travaux de réhabilitation des avenues Yennenga et Mogho dans la ville de Ouagadougou. Ce projet vise à garantir la connectivité entre la zone d'activité commerciale et administrative (ZACA) et la zone du grand marché, d'assurer l'accessibilité dans les meilleures conditions aux quartiers, Kamsonghin, Dapoya et Samandin.

Les travaux porteront principalement sur l'aménagement et le bitumage des voiries urbaines. Cela inclura la réhabilitation de la chaussée et le bitumage de la voie qui relie l'avenue Houari Boumédiène à l'avenue Nelson Mandela sur une distance de 800 m, ainsi que la réhabilitation de la chaussée et le bitumage de la voie qui relie l'avenue Bassawarga à l'avenue de la Grande mosquée sur un linéaire de 700 m (La Tribune du Faso, 2024).

Les tâches essentielles constituant les travaux sont :

- L'installation du chantier ;
- Les travaux préparatoires ;
- Les terrassements ;
- La construction du corps de chaussée en graveleux latéritique amélioré au concassé de granite ;
- Le revêtement en Béton Bitumineux (BB) ;
- La construction d'un réseau d'assainissement (caniveaux et dalots de traversée sous chaussées en béton armé, et éventuellement des dalots transversaux) ;
- La mise en œuvre de la signalisation verticale et horizontale et les dispositifs de sécurité routière.

Ainsi, ECW Sarl assure l'exécution des travaux, le contrôle et la surveillance sont assurés par le groupement de bureaux GTAH ingénieurs conseils, DECO-ingénieurs Conseils et Faso ingénierie, et le Ministère des Infrastructures et du Désenclavement est le Maître d'ouvrage.

II-2- Localisation de la zone du projet

L'avenue Mogho se situe au Burkina Faso dans la ville de Ouagadougou, province du Kadiogo, région du Centre. La figure 2 nous illustre la zone d'étude et le tronçon concerné par le projet.

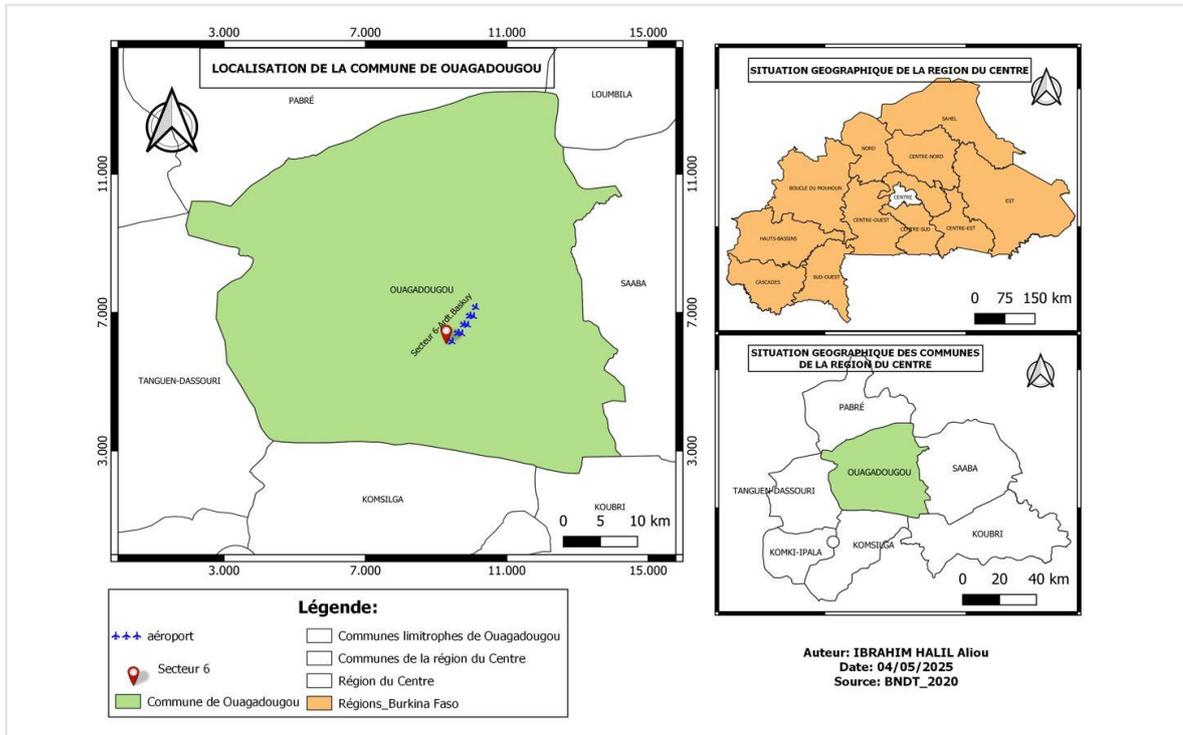


Figure 2: Zone d'étude et tronçon du projet

II-3- Quelques spécifications techniques des travaux

II-3-1- Avenue Yennenga

Les travaux comprennent : une chaussée de 2 voies, dont chacune a une largeur de 5,65 m ; 2 trottoirs de 3 m de largeur chacun de part et d'autre de la chaussée ; des caniveaux de sections : $80*80\text{ cm}^2$, $150*150\text{ cm}^2$ et des dalots de traversés ayant les mêmes sections que les caniveaux.

La structure du corps de la chaussée se présente comme suit :

- Couche de fondation = 20 cm d'épaisseur de graveleux latéritique amélioré au ciment ;
- Couche de base = 20 cm en grave non traitée (GNT) ;
- Revêtement = Béton Bitumineux pour la chaussée.

La figure 3 illustre la structure de la chaussée sur l'avenue Yennenga.

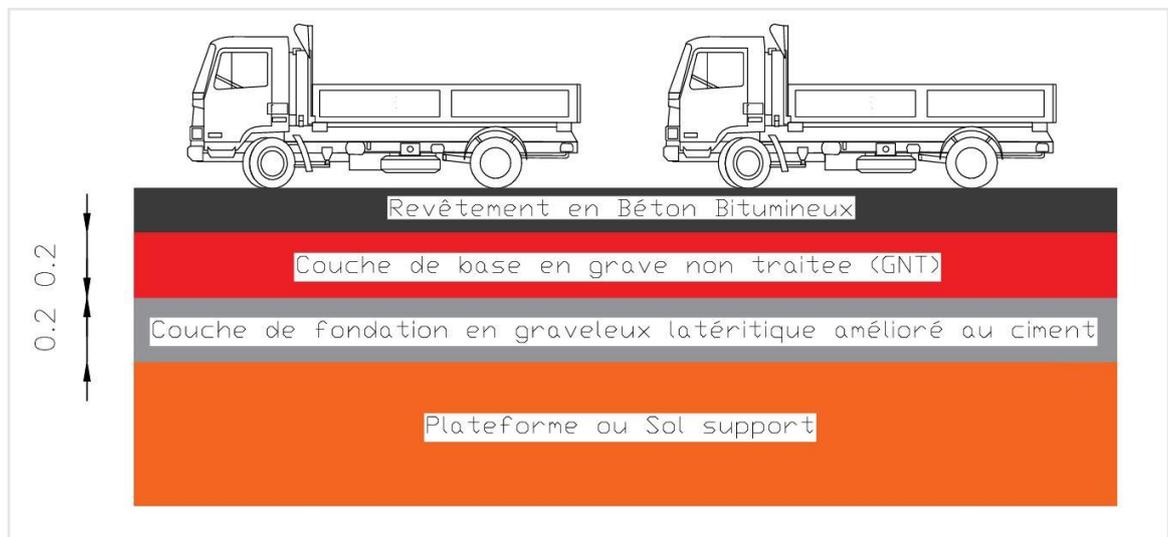


Figure 3: Structure de la chaussée sur l'avenue Yennenga

III-3-2- Avenue Mogho

Les travaux comprennent : une chaussée de 2 voies, dont chacune a une largeur de 4 m ; 1 trottoir de 3 m (à droite de la chaussée dans le sens du projet, Ouest-Est) ; des caniveaux de sections : $80*80\text{ cm}^2$, $80*100\text{ cm}^2$ sur un côté de la chaussée (à droite dans le sens du projet, Ouest-Est) et des dalots de traversés ayant les mêmes sections que les caniveaux.

La structure du corps de la chaussée se présente comme suit :

- Couche de fondation = 20 cm d'épaisseur de graveleux latéritique naturel ;
- Couche de base = 20 cm en graveleux latéritique amélioré aux concassés de granite 0/31.5 (litho-stabilisation) ;

NOTE : Le CCTP exige ici, un indice CBR à 4 jours d'immersion sur échantillons compactés à 98% de la densité maximale du Proctor Modifié supérieur ou égal à 110%.

- Revêtement : Béton Bitumineux pour la chaussée.

La figure 4 illustre la structure de la chaussée sur l'avenue Mogho.



Figure 4: Structure de la chaussée sur l'avenue Mogho

Conclusion

Dans ce chapitre, les bases du projet et le cadre de l'étude ont été illustré en précisant ses objectifs. Il en découle que les spécifications techniques des travaux à réaliser sont bien définies par le cahier des clauses techniques particulières. Ainsi, notre étude se focalisera sur la couche de base de l'avenue Mogho constituée de graveleux latéritique amélioré aux concassés de granite de classe 0/31,5.

Chapitre 2

Revue bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre, une synthèse de quelques recherches antérieures sur la latérite en tant que matériau de construction sera effectuée. Il s'intéressera à la structure et aux types de chaussées, suivi de quelques caractéristiques géotechniques du matériau latéritique et des techniques d'amélioration de ses propriétés physiques et mécaniques.

I- Généralités sur les chaussées

I-1- Définition

Une chaussée se définit comme étant une surface plane, résistante et imperméable conçue pour protéger le sol support des agressions causées par le trafic et les conditions climatiques (Fasfox, 2023). Elle peut revêtir différentes formes, telles que routière, ferroviaire, aéroportuaire. Sa construction comprend plusieurs couches pour garantir sa résistance et sa longévité, et elle peut adopter diverses structures selon la nature du sol, le volume de circulation et le type de chaussée (Fasfox, 2023).

I-2- Structure d'une chaussée

La chaussée ayant pour rôle de supporter le trafic qui y circule, est composée de plusieurs couches :

- ✓ La couche de surface : Il s'agit de la partie supérieure de la chaussée, composée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison. Cette couche est en contact direct avec les pneus des véhicules, tout en étant exposée aux conditions climatiques. Elle a pour fonction de résister aux impacts des pneus, limiter les infiltrations des eaux tout en assurant une bonne étanchéité, et d'assurer le confort des usagers.
- ✓ La couche de base : associée à la couche de fondation, elles constituent la couche d'assise. Cette couche a pour fonction de répartir les contraintes résultant des efforts exercés par les pneus.
- ✓ La couche de fondation : son rôle est similaire à celui de la couche de base.

La figure 5 présente les différentes couches d'une chaussée routière.

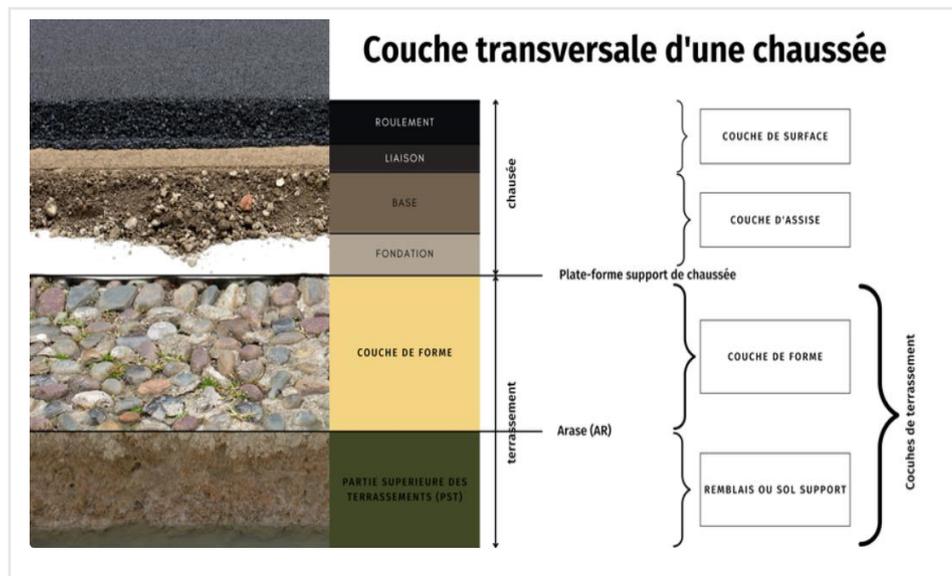


Figure 5: Différentes couches d'une chaussée routière

I-3- Types de chaussées

On distingue plusieurs types de chaussées (Lcpc setra, 1994) :

- ✓ Les chaussées souples : leur épaisseur est comprise entre 30cm et 60 cm, et leur couche superficielle est faite de matériaux bitumineux ;
- ✓ Les chaussées à structure mixte : leurs couches de surface et de base sont constituées de matériaux bitumineux, reposant sur une couche de fondation faite en matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- ✓ Les chaussées rigides : elles se caractérisent par un revêtement fait en béton de ciment ;
- ✓ Les chaussées bitumineuses épaisses : elles présentent une épaisseur comprise entre 15cm et 40 cm et sont constituées d'un revêtement fait en bitume, reposant sur une assise réalisée avec des matériaux traités aux liants hydrocarbonés ;
- ✓ Les chaussées inverses : composées de trois couches, elles ont une couche de surface en matériaux bitumineux, une couche granulaire, ainsi qu'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ;

Les chaussées semi-rigides ou à assise traitée aux liants hydrauliques : ces chaussées ont une épaisseur comprise entre 20 et 50 cm, incluant une couche de surface en bitume sur une assise de matériaux traités aux liants hydrauliques.

II- Généralités sur les latérites

II-1- Définition et types de latérites

Le terme « latérite » a été employé pour la première fois par (Buchanan, 1807) pour désigner un matériau utilisé dans la construction, particulièrement présent dans les régions montagneuses de Malabar en Inde. Selon (Buchanan, 1807), ce matériau se trouve à une profondeur faible dans les sols. Lorsqu'il est frais, il peut être facilement découpé, et exposé à l'air il durcit rapidement et devient très résistant aux intempéries. Il le présente comme étant un dépôt ferrugineux à morphologie vésiculaire, non stratifié et poreux de couleur jaune ocre en raison de la forte teneur en fer (Bourgeon & Gunnell, 2005).

Autret a recensé plusieurs types de latérites :

- ✓ Les sols fins ferrallitiques ;
- ✓ Les graveleux latéritiques, souvent utilisés en construction routière ;
- ✓ La carapace latérique ou horizon latéritique, qui est très dure ;
- ✓ La cuirasse latéritique, très dure et difficile à détruire même par des machines (Autret, P, 1983).

Lors des journées Africaines de géotechnique tenues en Côte d'Ivoire en 1988, il a été recommandé de restreindre l'emploi du mot latérite à des contextes précis, tels que :

- ✓ Graveleux latéritiques ;
- ✓ Argiles latéritiques ;
- ✓ Cuirasse ou carapace latéritique.

II-2- Les classifications usuelles

L'utilisation des matériaux en construction routière est régie par plusieurs conditions. L'une des plus importantes est la classification des sols. Il existe plusieurs systèmes de classification des sols dont les plus couramment utilisés pour les sols latéritiques en Afrique subtropicale sont la classification du Highway Research Board (HRB), la classification du Guide de Terrassements Routiers Français (GTR).

❖ Classification HRB

La classification HRB se base sur la granulométrie et les limites d'Atterberg. Selon que le pourcentage de fines ($< 80 \mu\text{m}$) est inférieur ou supérieur à 35% le sol est classé comme grossier ou fin. Ainsi 5 familles de sols sont déclinées : les sols graveleux et sableux (A-1), les sables fins (A-3), les sols graveleux et sableux argileux ou limoneux (A-2), les sols limoneux (A-4 et A-5) et les sols argileux (A-6 et A-7). Les graveleux latéritiques sont souvent dans les classes

A-2-4 à A-2-7, tandis que les sols fins latéritiques sont dans les classes A-7-5 à A-7-6 (Bagarre, 1990).

❖ Classification GTR

C'est une classification très utilisée en construction routière. Elle se base sur la granulométrie, les limites d'Atterberg et/ou les valeurs au bleu de méthylène. Ainsi on a les sols fins (A), les sols sableux et graveleux avec fines (B), les sols comportant des fines et de gros éléments (C) et enfin les sols insensibles à l'eau (D). (Bagarre, 1990) précise que la plupart des graveleux latéritiques se situe dans les classes allant de B2 à B6, tandis que les sols fins latéritiques sont entre A2 et A4.

II-3- Quelques caractéristiques physico-mécaniques des matériaux latéritiques

❖ Granulométrie

En ce qui concerne la granulométrie, les sols latéritiques se caractérisent par leur nature meuble, généralement de classes 0/20 à 0/40. Ils présentent un pourcentage de fines variant entre 10 et 35%, ainsi qu'un squelette granulaire (refus au tamis de 2 mm) compris entre 20 et 60% (Bagarre, E. (1990), Fall, M, 1993).

Les sols latéritiques dont le pourcentage de fines (passants au tamis de 80 μm) dépasse 35% ne sont pas classés comme graveleux latéritiques, car l'influence des sols fins devient plus significative.

❖ Poids spécifique

Le poids spécifique des sols latéritiques est compris entre 2,55 et 4,6 g/cm^3 généralement, selon (Maignien, 1966 ; Nanda et Krishnamachari, 1958). Ces valeurs sont élevées du fait de la présence de la proportion graveleuse dans laquelle se concentrent les oxydes de fer, (Daniel & Newill, 1959 ; Evans, 1958 ; M.D Gidigas, 1969 ; Nascimento, 1959).

L'étude du poids spécifique des matériaux dans un profil de latérite résiduelle révèle couramment des valeurs élevées au niveau de la roche mère sous-jacente, des valeurs faibles dans la zone intermédiaire, et à nouveau des valeurs élevées dans la carapace latéritique. Par conséquent, le poids spécifique fournit une indication précieuse du degré de latérisation (processus d'altération qui conduit à la formation de la latérite) et de dessiccation qui a eu lieu dans les différentes fractions du sol latéritique (Evans, 1958).

❖ Plasticité

L'indice de plasticité des sols latéritiques se situe entre 10 et 35% (Bagarre, E. (1990)). Toutefois, il est important de souligner les difficultés rencontrées pour produire les résultats des essais de limites d'Atterberg sur ces sols.

En effet, certains sols latéritiques ont tendance à produire des particules fines lors de la préparation de l'essai, en fonction du degré de malaxage, ce qui peut conduire à une augmentation de la plasticité. (Newill, 1961) explique que ce phénomène est lié à la présence de micro-agrégats de particules individuelles et d'oxyde de fer hydraté dans certaines latérites (Evans, 1958).

❖ Compacité

Les analyses réalisées sur le terrain et en laboratoire pour évaluer la compacité des matériaux latéritiques montrent que les principaux facteurs influençant les résultats des essais de compacité sont principalement liés au processus de formations des sols latéritiques, ainsi qu'aux méthodes d'essai et à la préparation des échantillons. La densité sèche maximale et la teneur en eau optimale sont conditionnées par la roche mère, l'origine génétique et la position du sol dans le profil pédologique (Evans, 1958).

Il est important de souligner que l'accroissement de l'effort de compactage semble entrainer une augmentation plus significative de la densité sèche des particules de plus petites tailles. De ce fait, il apparaît que les propriétés de compactage des sols latéritiques sont également affectées par leur origine, le degré d'altération et la proportion de minéraux argileux présents.

Selon l'ISTED (International Seminar on Teacher Training and Education, 1990), une teneur initiale en eau de 27% augmente à 39% après compactage à l'énergie du Proctor Modifié, et atteint 59% à 1,4 fois cette énergie.

❖ Indice CBR

L'essai de CBR (Californian Bearing Ration), essai de l'indice portant Californien en français, est un outil précieux pour évaluer les matériaux destinés à la construction de chaussées souples. Cet essai de pénétration a été principalement développé par le Haut Département des Transports de l'État de Californie aux États-Unis, afin d'évaluer la résistance des couches de fondations.

Il consiste à mesurer la charge appliquée par un piston de dimensions standard sur un échantillon de sol avant et après une période d'imbibition de quatre jours de cet échantillon (Evans, 1958). L'indice CBR immédiat décrit la progression de la portance d'un sol support, tandis que l'indice CBR à 96 heures d'immersion (dans l'eau) reflète l'évolution de la portance d'un sol support soumis à des fluctuations des conditions hydriques.

II-4- Latérite dans la construction routière

Les sols latéritiques sont des matériaux largement employés dans les régions tropicales pour la construction de remblais, de barrages et d'infrastructures routières. Le matériau le plus couramment utilisé est la grave latéritique, dont l'utilisation varie en fonction de la qualité, allant de la couche de forme à la couche de base (Autret, P, 1980). L'étude du traitement de ces matériaux est désormais approfondie afin de répondre à la demande croissante liée aux nouveaux projets, tout en cherchant à remédier aux pathologies des routes, souvent soumises à des surcharges qui nuisent à leur durabilité.

III- Techniques d'amélioration et de traitement des sols

Il existe diverses techniques de traitement de sol, notamment la stabilisation aux liants hydrauliques et la stabilisation physique ou mécanique. Nous allons ainsi nous focaliser sur la technique de litho-stabilisation qui répond aux exigences du projet, et sur le traitement par ajout de ciment car il est le plus utilisé au Burkina Faso.

III-1- Amélioration par ajout du ciment

Le traitement des sols à l'aide de liants hydrauliques est une méthode qui consiste à mélanger un agent de liaison, éventuellement avec de l'eau, directement dans le sol. Ce mélange est effectué de manière à obtenir un matériau homogène, permettant ainsi d'améliorer les propriétés du sol. Cette technique offre un avantage mécanique en permettant de valoriser des matériaux présentant des caractéristiques géotechniques inadaptées et qui ne peuvent pas être utilisés dans leur état naturel.

En ce qui concerne l'utilisation du ciment pour le traitement des sols, son efficacité est plus marquée dans les sols peu argileux. En effet, plus la teneur en argile du sol est élevée, plus il devient difficile pour le ciment de recouvrir et de lier les particules (Abdo, J., & Serfass, J, 2009). La stabilisation des sols avec du ciment est particulièrement efficace pour les sols sableux ayant un indice de plasticité variant entre 10 et 20% et une fraction de fines comprise entre 10 et 30%. De plus, cette méthode est recommandée pour les sols riches en minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite et le quartz (Houben, H., & Guillaud, H, 2006). Par ailleurs, les sols latéritiques qui contiennent des silices et des alumines provenant de la goethite et de l'hématite, montrent également une bonne réponse à la stabilisation au ciment, entraînant des réactions pouzzolaniques et un durcissement du matériau. L'amélioration des sols latéritiques pourrait constituer une solution à la fois économique et efficace pour la conception de chaussées flexibles, en comparaison avec la stabilisation Sariosseiri, F., & Muhunthan, B, 2009).

III-2- Amélioration par la litho-stabilisation

La litho-stabilisation est une méthode qui permet de stabiliser mécaniquement un sol de qualité inférieure en y ajoutant des granulats concassés ou un matériau plus structuré (Lompo, P, 1980). Cette technique consiste à améliorer un sol par étapes, en incorporant une proportion de granulats concassés ou d'autres matériaux plus structurés. Par la suite, des essais sont réalisés pour évaluer les performances mécaniques obtenues.

La litho-stabilisation a été développée à partir des recherches géotechniques effectuées au LNBTP (Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics) /Burkina dans le cadre du projet d'aménagement de la route Ouagadougou-Yako. Ces travaux, dirigés par Pierre Lompo, responsable du service géotechnique routière du laboratoire, ont été présentés lors de la IVème Conférence Routière Africaine qui s'est tenue à Nairobi, au Kenya, du 20 au 25 janvier 1980. Les essais ont été réalisés sur une GAL avec les caractéristiques suivantes :

- Pourcentage de fines (< 0,08 mm) : 25
- Indice de Plasticité (IP) : 20
- CBR à 95 % de la densité sèche maximale après 4 jours d'imbibition : 58%

Ce matériau a été amélioré avec des ajouts de concassé 0/31,5 à des taux de 10, 15, 20, 25 et 30%. Les résultats ont révélé que l'indice portant CBR à 95 % atteignait 80 lorsque le matériau était amélioré à 30 % de concassé. Toutefois, cette étude n'a pas été immédiatement suivie d'applications concrètes. Ce n'est que plus tard que cette technique a été mise en œuvre comme couche de base avec du concassé 12/40 par l'entreprise « Bourdin et chaussée » pour la construction de la route Ouagadougou/Koudougou (Lompo, 1980).

Le CEBTP énonce plusieurs exigences concernant les propriétés des granulats pouvant être utilisés lors de la litho-stabilisation, ils peuvent être :

- ✓ Un tout-venant pierreux anguleux de type 0/40, avec moins de 30% de particules passant au tamis de 2 mm et moins de 18% passant au tamis de 80 µm, un indice de plasticité nul et un CBR à 95% OPM d'environ 90% ;
- ✓ Un granulats concassés de carrière à granulométrie discontinue, tel que du 12/40 ;
- ✓ Ou tout autre matériau provenant de ressources locales.

Le mélange doit avoir un indice de plasticité inférieur à 15 et un CBR à l'optimum supérieur à 80% pour une utilisation en couche de base.

La litho-stabilisation améliore l'indice CBR des sols latéritiques (Ahouet, L., & Elenga, R. G, 2019). Dans une étude menée en Ouganda sur des sols latéritiques, des granulats de roche de classe 0/37,5 mm ont été ajoutés à des proportions de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% du poids

sec du sol. L'ajout de ces granulats a permis une augmentation du CBR allant de 2,5% à 63%, en fonction de la quantité de granulats ajoutés (Jjuuko, S., Kalumba, D., Bbira, S., & Bamutenda John Bosco, 2014).

En 2023, une étude a été menée au Burkina Faso par Marie MBENGUE (Mbengue, 2023) sur les emprunts de Saaba et de Kamboinsé, les essais ont été réalisés sur des GAL ayant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Emprunt de Saaba : Deux couches ont été étudié, et une couche théorique qui est le mélange des deux premières. Le tableau 2 illustre leurs caractéristiques.

Tableau 2: Caractéristiques des GAL de Saaba (Mbengue, 2023)

Couches	Fines	Particules grossiers	Indice de plasticité	CBR à 95% de l'OPM	Module de Young à 95%	Resistance à la compression
C1_S	33	38,3	12	11	21	0,53
C2_S	32	38,3	15	16	60	0,90
CM_S	29	38	16	17	29	0,55

- ✓ Emprunt de Kamboinsé : Deux couches ont été étudié, le tableau 3 illustre leurs caractéristiques.

Tableau 3: Caractéristiques des GAL de Kamboinsin (Mbengue, 2023)

Couches	Fines	Particules grossiers	Indice de plasticité	CBR à 95% de l'OPM	Module de Young à 95%	Resistance à la compression
C1_K	30,5	57	19	49	20	0,53
C2_K	64	87	22,2	4	33	0,69

Ces matériaux ont été amélioré avec des ajouts de concassé 0/31,5 à des taux de 20, 25, 30 et 35 %. Les résultats ont révélé une diminution la teneur en eau optimale de l'ordre de 20 à 40%, l'indice de plasticité est réduit de l'ordre de 6 à 37%. Les squelettes granulométriques des sols ont été renforcés, les sols de Saaba sont restés dans la même classe granulométrique tandis que ceux de Kamboinsé ont vu leur classe changer, C1_K qui passe de A-2-7 à A-2-6 et C2_K qui passe de A-7-5 à A6 selon la classification HRB. L'ajout de granulats concassés de granites a également entraîné une augmentation de la densité sèche maximale (4% à 17%) et du CBR

après 4 jours d'immersion dans l'eau (70% à 297%), du module d'élasticité (28 à 2520%) et de la résistance à la compression (5% à 620%).

(Mbengue, 2023) précise que les valeurs des modules d'élasticité et de résistance à la compression des matériaux de Saaba stabilisés aux granulats concassés de granites sont largement plus élevés que celles des matériaux de Kamboinsé. Or, en ce qui concerne les indices CBR, les indices CBR de C1_K sont plus élevés que ceux de Saaba. Les études de (Mbengue, 2023) ont révélé qu'il serait intéressant de prendre en compte en plus de l'indice CBR, les paramètres tels que le module d'élasticité ou la résistance à la compression issus de l'essai de compression simple afin de s'assurer lequel de ces paramètres est le plus contraignant pour le dimensionnement des chaussées.

Conclusion

La latérite se révèle être un matériau de construction prometteur pour les chaussées, en raison de ses propriétés géotechniques avantageuses et de sa disponibilité dans les régions tropicales, en particulier au Burkina Faso. Néanmoins, elle nécessite bien de fois une amélioration pour leur usage en couche de base. Pour cela, les méthodes de traitement et d'amélioration de la latérite offrent des solutions pour surmonter les défis liés à sa durabilité et à sa performance. Les travaux analysés dans la revue montrent que les meilleures améliorations par la litho-stabilisation sont obtenues entre 10 et 35% d'ajout de concassés de granite.

Chapitre 3

Matériels et Méthodes

Introduction

Ce chapitre se concentre sur les différents essais géotechniques nécessaires pour identifier et caractériser les différents échantillons prélevés sur les sites d'emprunt, et également les mélanges de latérite et de concassés de granite.

I- Méthodologie de l'étude

La résolution du problème impose une méthodologie de travail bien établie. Le schéma de la figure 6 résume les étapes successives qui permettront de mieux appréhender le problème.

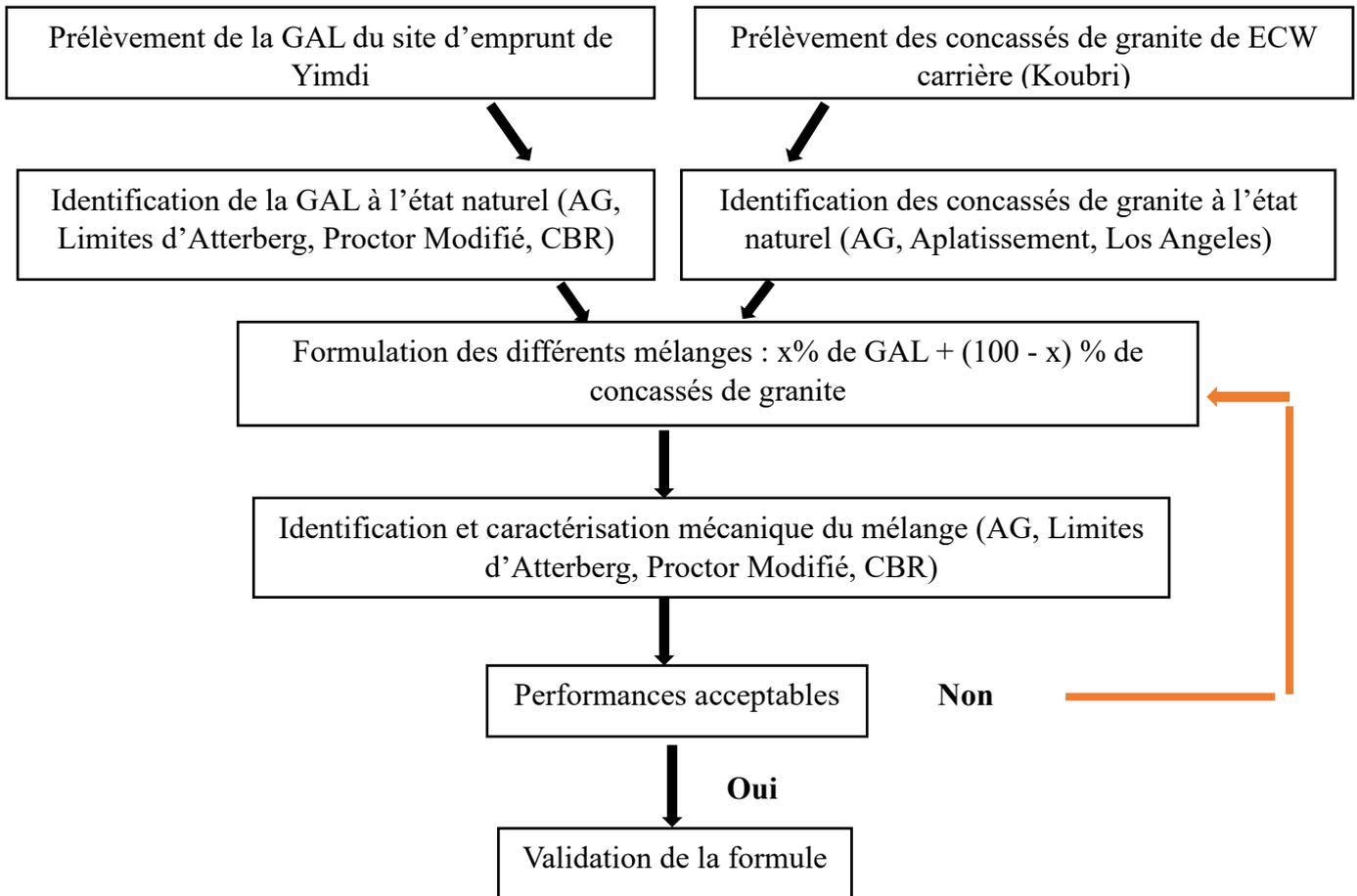


Figure 6: Schéma synoptique du travail à effectuer

II- Essais d'identification

Les échantillons de sol latéritique et de concassés de granite collectés à partir des carrières de Yimdi et de Koubri (ECW carrière) respectivement, ont été soumis aux essais d'identification tels que l'Analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, afin de connaître leurs caractéristiques physiques.

II-1- Echantillonnage

Les essais réalisés en laboratoire concernent des quantités limitées de matériaux. Il est essentiel que l'échantillon utilisé en laboratoire soit représentatif de la totalité. Il est effectué dans notre cas par quartage : l'échantillon est divisé en quatre portions égales, puis deux quarts opposés sont combinés pour former une moitié retenue. Cette sélection est ensuite homogénéisée et un nouveau quartage est réalisé (NF P 84-504, 1993). Ce processus est présenté par la figure 7.



Figure 7: Echantillonnage par quartage des matériaux

II-2- Analyse Granulométrique par tamisage

L'Analyse Granulométrique permet de déterminer la répartition des grains d'un matériau (NF P 94-056, 1996). Elle consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse. La figure 8 illustre une balance et les tamis pour l'analyse granulométrique par tamisage.



Figure 8: Balance et tamis pour l'analyse granulométrique par tamisage

Au terme de l'essai, on calcule les paramètres suivants :

- ✓ La teneur en eau : $W = \frac{m_h - m_s}{m_s - m_{tare}} * 100$ avec m_h la masse humide de l'échantillon prélevé dans la tare (avant étuvage), m_s la masse totale sèche de l'échantillon prélevé dans la tare (après étuvage), et m_{tare} la masse de la tare ;
- ✓ La masse sèche de l'échantillon : $M_s = \frac{M_h}{(1+W)} * 100$ avec M_h la masse humide de l'échantillon, et W la teneur en eau de l'échantillon ;
- ✓ La masse des refus cumulés : $\%_{refus} = \frac{R_i}{M_s} * 100$ avec R_i la masse cumulée de refus du tamis i , et M_s la masse sèche de l'échantillon ;
- ✓ Le pourcentage de tamisât : $\%_{tamisat} = 100 - \%_{refus}$;
- ✓ Le coefficient d'uniformité : $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$;
- ✓ Le coefficient de courbure : $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}}$; avec d_i le diamètre des tamis correspondant à i % en masse de tamisât.

II-3- Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance (NF P 94-051, 1993). Cet essai permet de déterminer des indicateurs qui qualifient la plasticité d'un sol. Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui donnent les seuils suivant (voir figure 9) :

- La teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique (limite de liquidité W_L) ;
- La teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide (limite de plasticité W_P) ;
- L'étendue du domaine plastique, c'est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité (indice de plasticité I_p).

Les seuils de plasticité et de liquidité sont présentés par la figure 9.

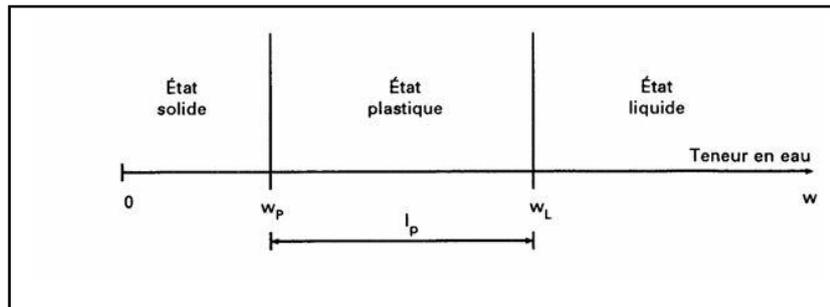


Figure 9: Représentation des limites d'Atterberg (NF P 94-051, 1993)

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.



Figure 11: Appareil de casagrande pour la limite de liquidité

II-4- Coefficient d'Aplatissement

La détermination du coefficient d'aplatissement constitue l'un des tests permettant de faire la caractérisation de la forme plus ou moins massive des granulats. L'essai a été réalisé conformément à la norme (NF EN 933-3, 1997).

Le coefficient d'aplatissement est déterminé par une double analyse granulométrique réalisée sur le même échantillon de granulats de diamètres compris entre 4 mm et 80 mm. Cette méthode consiste à utiliser successivement deux types de tamis :

- Une série de tamis normalisés à mailles carrées et ;
- Une série de tamis à fentes de largeurs standardisées, dont les dimensions (en mm) sont les suivantes : 80 ; 63 ; 50 ; 40 ; 31,5 ; 25 ; 20 ; 16 ; 12,5 ; 10 ; 8 ; 6,3 ; 5 ; 4, tels que présenté par la figure 12.



Figure 12: Grille pour l'essai d'aplatissement

Les paramètres à calculer ici sont les suivants :

- ✓ Le coefficient d'aplatissement élémentaire $A_i = \frac{m_x}{m_y} * 100$ avec m_x la masse de l'échantillon i passant à travers la grille i , et m_y la masse de l'échantillon élémentaire i ;
- ✓ Le coefficient d'aplatissement global $A = \frac{M_X}{M_Y} * 100$ avec M_X la somme des masses des échantillons traversant les grilles X , et M_Y la somme des masses des échantillons élémentaires.

III- Essais mécaniques

Les essais (Proctor modifié, CBR, Los Angeles) permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques (portance) des échantillons de sol.

III-1- Proctor modifié

Cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé (NF P 94-078, 1999). La figure 13 illustre le moule Proctor et la dame Proctor.



Figure 13: Moule Proctor et Dame Proctor

Les paramètres de l'optimum Proctor sont déterminés en traçant la courbe Densité sèche (en t/m^3) = f (Teneur en eau en %) avec :

$$\checkmark \text{ Densité humide} = \frac{M_h - M_{\text{moule}}}{V_{\text{moule}}};$$

- ✓ Densité sèche = $\left(\frac{\text{Densité humide}}{(1+W)} \right) * 100$ avec M_h la masse humide de l'échantillon, M_{moule} la masse du moule, V_{moule} le volume du moule et W la teneur en eau de l'échantillon ;

Après avoir tracé la courbe, on repère le point le plus haut de cette courbe. Les coordonnées de ce point nous donnent en abscisse la teneur en eau optimale, et en ordonnées la densité sèche maximale.

III-2- Essai CBR

L'essai CBR encore appelé Californian Bearing Ratio, permet de déterminer des grandeurs utilisées pour déterminer la portance d'un sol (NF P 94-078, 1997). Il consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon pour le faire pénétrer à la vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. La figure 14 illustre le moule CBR et la presse CBR.

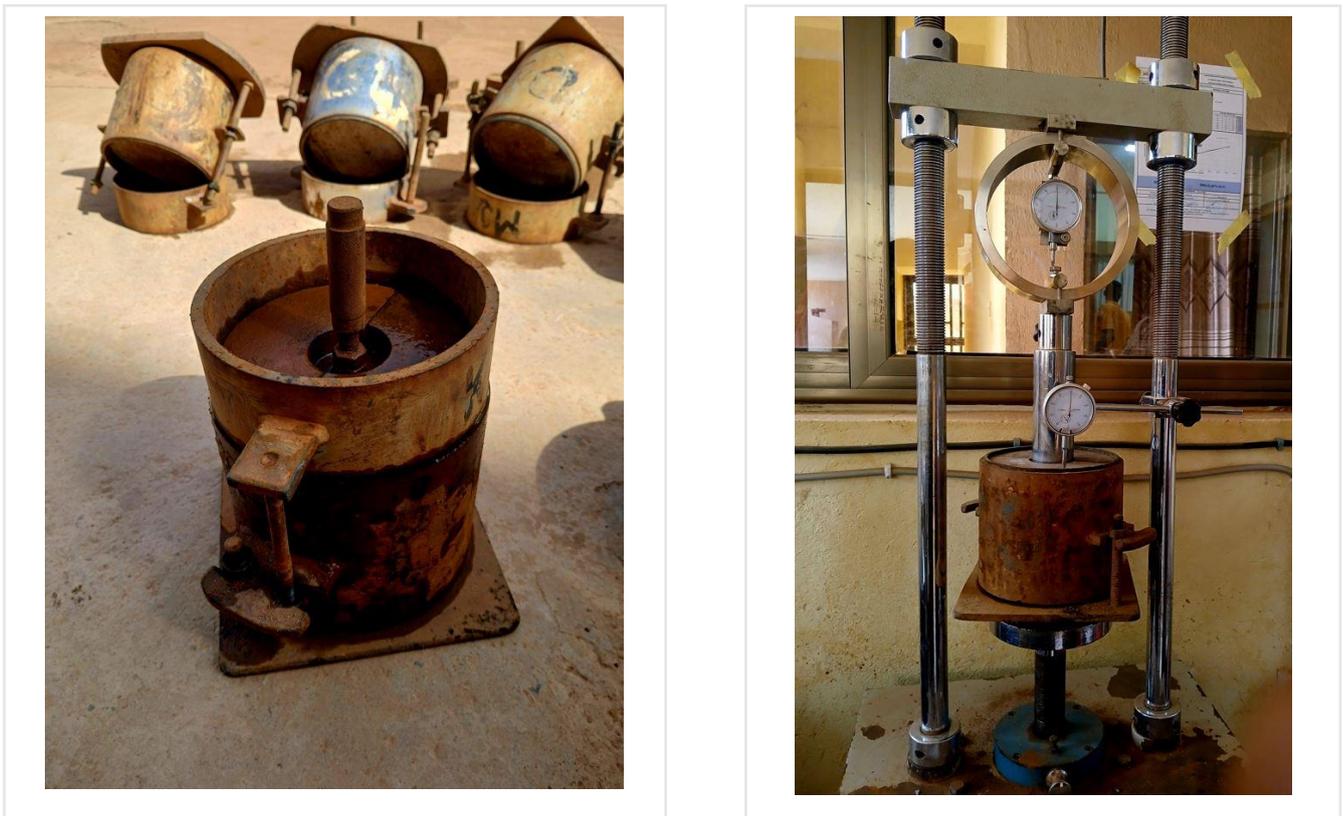


Figure 14: Moule CBR et presse CBR

Après poinçonnement du matériau, les indices suivants sont calculés :

$$\checkmark \text{ I.CBR } 2.5\text{mm} = \frac{\text{Force de pénétration à } 2,5 \text{ mm d'enfoncement}}{13,35} * 100$$

$$\checkmark \text{ I.CBR } 5\text{mm} = \frac{\text{Force de pénétration à } 5 \text{ mm d'enfoncement (en kN)}}{20} * 100$$

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports calculés.

III-3- Los Angeles

L'essai Los Angeles vise à évaluer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulats (NF P 18-573, 1990).

On évalue ici, la quantité d'éléments de taille inférieure à 1,6 mm générés en soumettant le matériau (5000g \pm 5g dont 2000g de passants au tamis de 25 et retenus au tamis de 16, et 3000g de passants au tamis de 16 et retenus au tamis de 10) à des chocs (impacts) de boulets normalisés (11 boulets dans notre cas), pendant 500 rotations dans la machine Los Angeles. La figure 15 illustre les boulets et l'appareil pour l'essai Los Angeles.



Figure 15: Boulets et appareil pour l'essai Los Angeles

Le coefficient Los Angeles (L_A) = $\frac{M-m}{M} * 100$ avec m masse sèche en grammes des passants au tamis de 1,6 mm après l'essai, et M la masse de l'échantillon initial égale à 5000g.

Conclusion

L'Approche méthodologique revêt une importance cruciale pour garantir la fiabilité, la reproductivité et la validité des résultats attendus. Ce chapitre a donc mis en évidence les protocoles expérimentaux à suivre pour identifier et caractériser les différents matériaux selon les normes en vigueur.

Chapitre 4

Résultats, Interprétations et Discussions

Introduction

Ce chapitre illustrera les résultats obtenus lors des différentes investigations et leurs interprétations. Il commencera par une présentation des caractéristiques physiques et mécaniques du graveleux latéritique cru, suivi de celles des concassés de granite. Ensuite la présentation des résultats issus de l'analyse des différents mélanges à 10%, 20% et 30% (de la masse sèche de latérite) de concassés de granite, et enfin quelques aspects de la mise en œuvre et du contrôle pendant et après l'exécution de la couche de base litho-stabilisée.

I- Caractérisation des matériaux crus provenant des carrières

I-1- Caractérisation du graveleux latéritique cru

I-1-1- Analyse granulométrique par tamisage

La figure 16 nous présente la courbe granulométrique du graveleux latéritique cru.

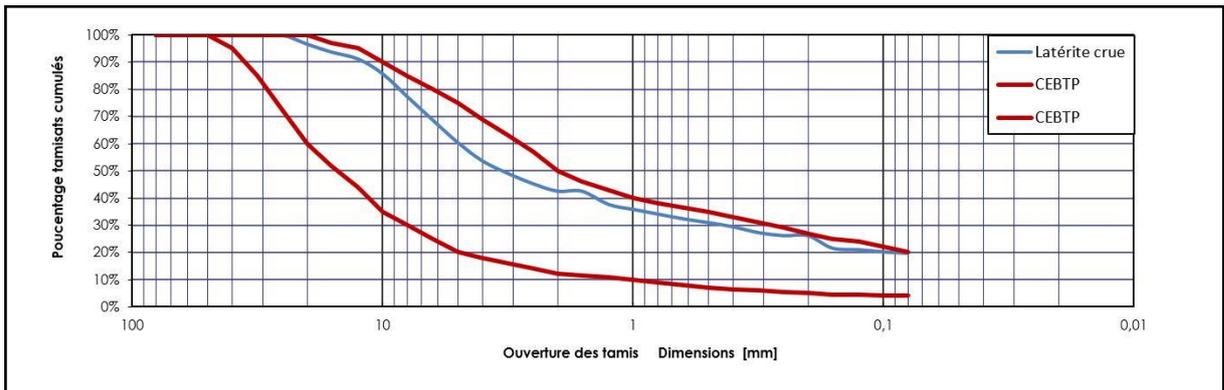


Figure 16: Courbe granulométrique des graveleux latéritiques crus insérée dans le fuseau du CEBTP pour les GAL en couche de base

Interprétation : La courbe granulométrique (en bleue) obtenue après analyse des échantillons de graveleux latéritiques de Yimdi, s'insère intégralement dans le fuseau (en rouge) proposé par le CEBTP pour les graveleux latéritiques en couche de base. Les détails du tracé de cette courbe se trouvent en annexe 1.

Le tableau 4 présente quelques caractéristiques de cet échantillon de sol.

Tableau 4: Quelques paramètres granulométriques de la latérite crue

Quelques paramètres de la latérite crue	
Passants (tamis de 80µm)	19,1%
Refus (tamis de 2mm)	57,5%

Les passants au tamis de 80 μ m étant égal à 19,1%, soit 19,1% de fines. Cette valeur est inférieure au maximum autorisé (20%) par le CEBTP pour ce type de sol en couche de base. Le refus au tamis de 2mm nous permet de conclure que ce graveleux latéritique contient 57,5% de particules grossiers.

I-1-2- Limites d'Atterberg

Les résultats de la limite de liquidité sont présentés par la figure 17.

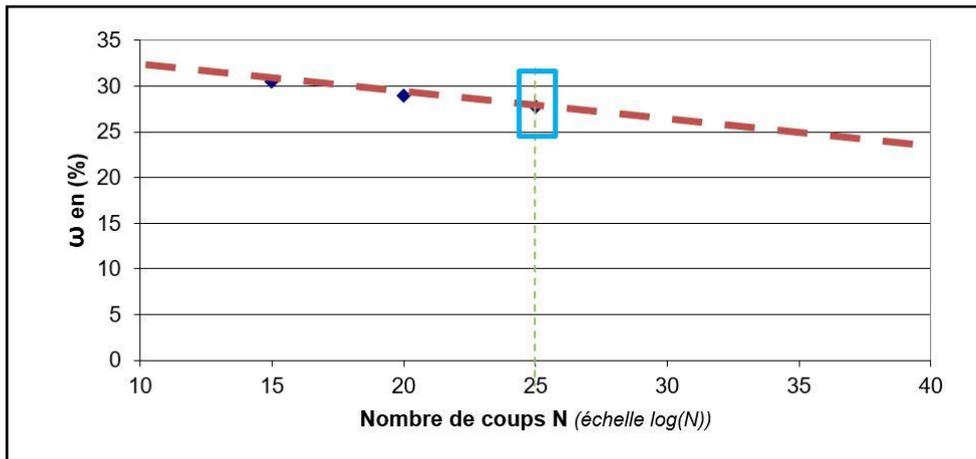


Figure 17: Limite de liquidité de la latérite crue

Le tableau 5 regroupe les résultats de cet essai :

Tableau 5: Limites d'Atterberg du graveleux latéritique cru

Limites d'Atterberg		
WL : Limite de liquidité (%)	WP : Limite de plasticité (%)	IP : Indice de plasticité (%)
28,0	14,6	13,2

Interprétation : Nous avons obtenu une limite de liquidité du graveleux latéritique crue égale à 28,0% et un indice de plasticité égal à 13,2%. Cette valeur de IP est inférieure à 15 comme proposé dans le CEBTP. Les détails du calcul se trouvent en annexe 2.

❖ Classification selon le diagramme de Casagrande

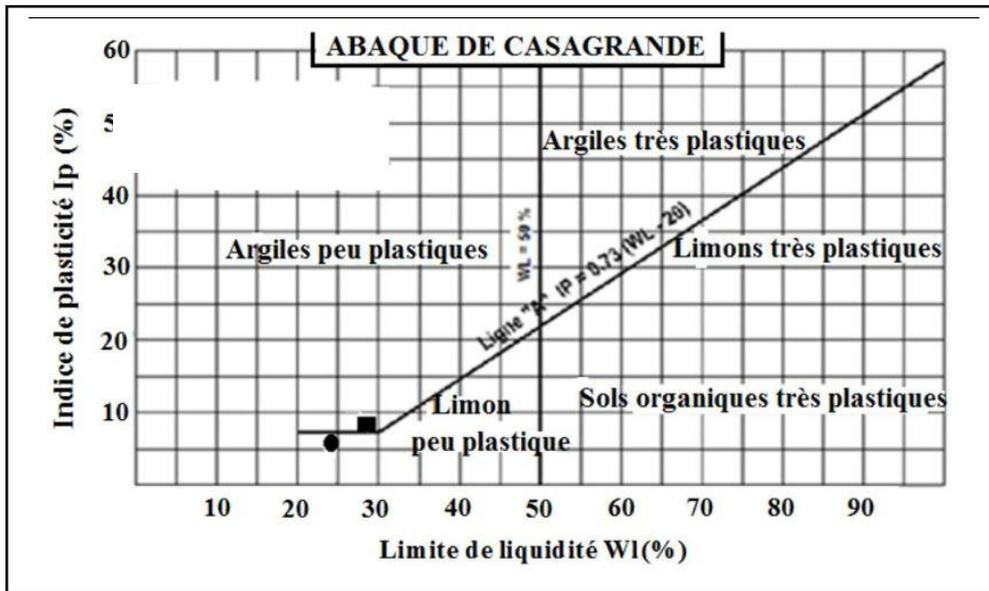


Figure 18: Abaque de Casagrande pour les limites d’Atterberg

Le diagramme de Casagrande nous permet de conclure que notre graveleux latéritique est une argile peu plastique, car les valeurs de WL (égale à 28,0%) et IP (qui vaut 13,2%), se trouve dans la marge des argiles peu plastiques.

❖ Classification selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR)

Les passants à 80µm sont compris entre 12 et 35%, et IP est supérieur à 12, alors notre graveleux latéritique est de classe B6.

I-1-3- Proctor modifié

Les résultats du Proctor Modifié sont illustrés sur la figure 19 :

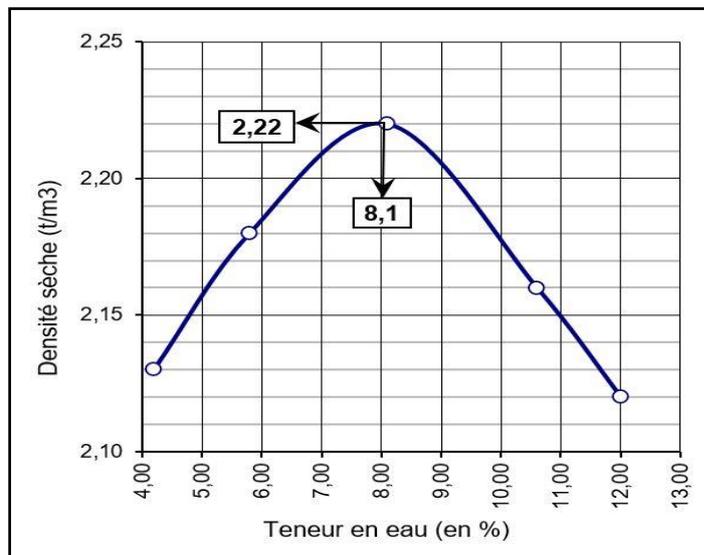


Figure 19: Proctor modifié du graveleux latéritique cru

Interprétation : Nous avons obtenu au terme de cet essai, l'optimum Proctor caractérisé par :

- ✓ Une teneur en eau optimale $W = 8,1\%$;
- ✓ Une densité sèche maximale $\gamma_{Dmax} = 2,22 \text{ t/m}^3$;

La valeur de la densité sèche maximale est supérieure à 2 t/m^3 , comme proposé par le CEBTP.

Les détails du calcul se trouvent en annexe 3.

I-1-4- CBR

Les valeurs obtenues à partir des courbes après poinçonnement des éprouvettes ayant subi respectivement 56, 25 et 10 coups nous ont permis de tracer la courbe représentant la densité sèche en fonction du CBR. La figure 20 illustre la variation de la densité sèche en fonction du CBR de la GAL.

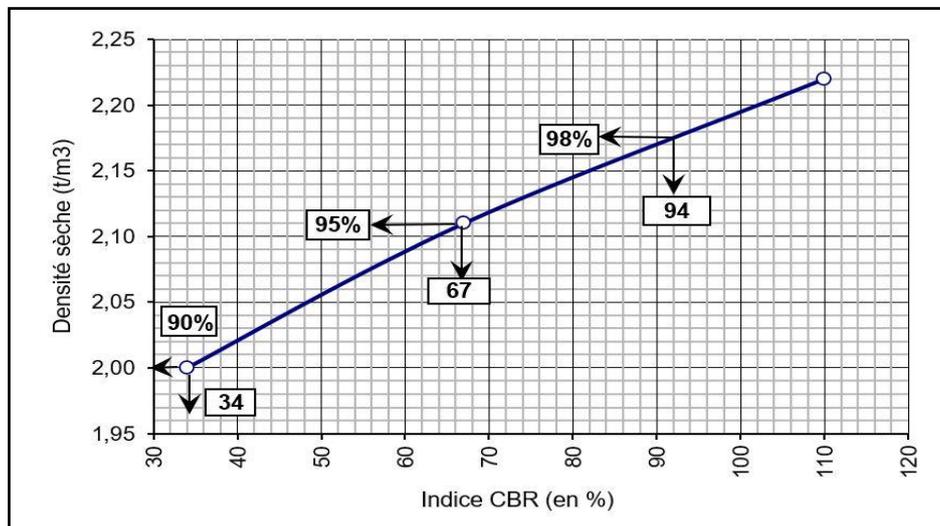


Figure 20: Indices CBR du graveleux latéritique cru

Interprétation : Nous avons obtenu trois indices CBR :

- ✓ A 98% de l'OPM, l'indice CBR est de 94% ;
- ✓ A 95% de l'OPM, l'indice CBR est de 67% ;
- ✓ A 90% de l'OPM, l'indice CBR est de 34%.

L'indice portant CBR à 95% de l'OPM est supérieur à 30, nous pouvons donc conclure que notre sol est de classe S_5 selon le (CEBTP, 1980). Les détails du calcul se trouvent en annexe 4.

I-1-5- Synthèse des résultats d'identification de la latérite crue

Le tableau 6 illustre une synthèse des résultats obtenus suite aux essais effectués sur la GAL crue, avec les exigences du projet et/ou du CEBTP.

Tableau 6: Résultats d'identification de la latérite crue

Paramètres	Valeurs obtenues	Exigences du projet et/ou du CEBTP
Passants au tamis de 80µm (%)	19,1%	< 20%
Refus au tamis de 2mm (%)	57,5%	
Indice de plasticité	13,2%	< 15%
Densité sèche maximale	2,22 t/m ³	≥ 2 t/m ³
Indice CBR à 98% de l'OPM	94%	≥ 110%

Du point de vue de ses caractéristiques physiques, ce graveleux latéritique est utilisable en couche de base car il répond aux exigences du CEBTP. Néanmoins, ses caractéristiques mécaniques, notamment le CBR, ne répondent pas aux exigences du projet. Ce qui nous a donc amené, à étudier les concassés de granite.

I-2- Caractérisation des concassés de granite

I-2-1- Analyse granulométrique

La figure 21 nous présente la courbe granulométrique des concassés de granite à l'état naturel, provenant de ECW carrière.

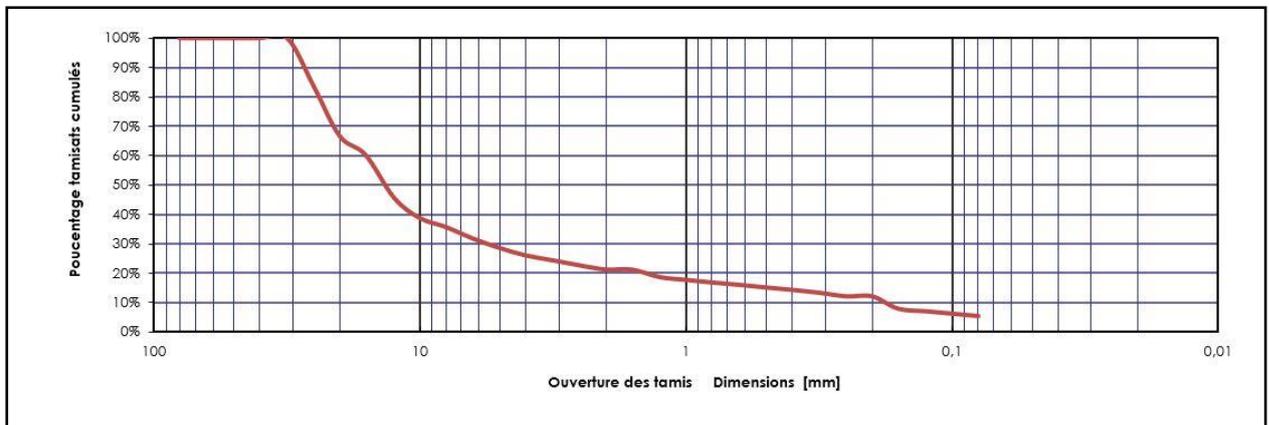


Figure 21: Courbe granulométrique des concassés de granite

Les caractéristiques de ces concassés sont regroupées dans le tableau 7 :

Tableau 7: Paramètres granulométriques des concassés de granite

Concassés de granite 0/31,5	
Passants (tamis de 80µm)	5,5%
Refus (tamis de 2mm)	78,7%

Interprétation : On a 5,5% de passants au tamis de 80 μ m, donc 5,5% de particules fines ; et les particules grossières représentent 78,7% de ce matériau. Les détails du tracé de cette courbe se trouvent en annexe 5.

I-2-2- Coefficient d'aplatissement

Le tableau 8 nous illustre le résultat de cet essai :

Tableau 8: Coefficient d'aplatissement des concassés de granite

Tamis (mm)	Grilles	Refus partiels tamis (g)	Passants grilles (g)	Coefficient d'aplatissement
50	31,5			16,19%
40	25			
31,5	20	498	29	
25	16	856	112	
20	12,5	864	78	
16	10	332	82	
12,5	8	750	130	
10	6,3	358	49	
8	5	154	38	
6,3	4	210	39	
5	3,15	162	36	
4	2,5	230	41	
Total		3916	634	

Interprétation : La forme des granulats est favorable car le coefficient d'aplatissement est inférieur à 20%, exigé par le CCTP. La fiche d'essai se trouve en annexe 6.

I-2-3- Los Angeles

Les résultats de cet essai sont consignés dans le tableau 9 :

Tableau 9: Coefficient Los Angeles des concassés de granite

Masse de l'échantillon M	Nombre de boulets	Masse refus tamis de 1,6	% refus tamis de 1,6	% passants tamis de 1,6	Los Angeles
5 000 g	11	3 912 g	78,4%	21,7%	21,7%

Interprétation : Los Angeles < 30%, donc les granulats sont résistants vis-à-vis des exigences du CEBTP.

I-2-4- Synthèse des résultats d'identification des concassés de granite

Le tableau 10 présente les résultats obtenus suite aux essais d'identification effectués sur les concassés de granite.

Tableau 10: Résultats d'identification des concassés de granite

Paramètres	Valeurs obtenues	Exigences du CEBTP
Passants au tamis de 80µm (%)	5,5%	< 10%
Refus au tamis de 2mm (%)	78,7%	
Coefficient Los Angeles	21,7%	≤ 30% (T4-T5)
Coefficient d' Aplatissement	16,19%	< 20%

Interprétation : Le CCTP du projet ne donnant aucune exigence sur les caractéristiques des concassés de granite, nous nous sommes référés à celles du CEBTP. On constate ici, que ces concassés de granite de classe 0/31,5 répondent à toutes les exigences du CEBTP, et par conséquent, elles sont utilisables en construction routière.

II- Caractérisation des mélanges de la grave latéritique et des concassés de granite (litho-stabilisation)

II-1- Analyse granulométrique par tamisage

La courbe granulométrique obtenue après le tamisage à sec des différents mélanges de matériaux, est représentée sur la figure 22.

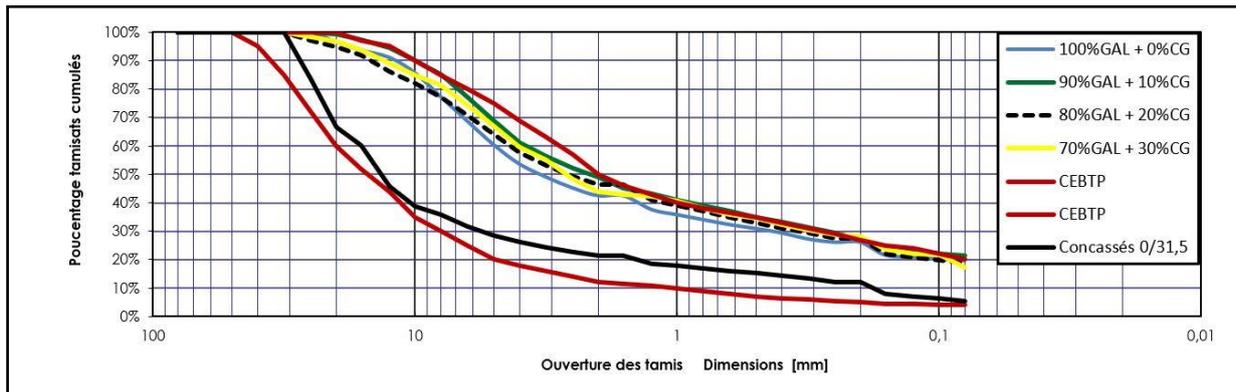


Figure 22: Courbes granulométriques des différents mélanges

Interprétation : Les courbes granulométriques obtenues suite aux mélanges à proportions variées de 0/31,5 s'insèrent pratiquement toutes, dans le fuseau proposé par le CEBTP pour les couches de bases. Le tableau 11 nous présente quelques paramètres granulométriques de nos

différents mélanges. Les détails du tracé de la courbe du mélange à 20% se trouvent en annexe 7.

Tableau 11: Quelques paramètres granulométriques des mélanges

Quelques paramètres des mélanges		
Différents mélanges	Passants au tamis de 80 μ m (%)	Refus au tamis de 2mm (%)
100%GAL + 0%CG	19,1	57,5
90%GAL + 10%CG	21,4	51,1
80%GAL + 20%CG	18,9	53,7
70%GAL + 30%CG	17,35	56,1

D'après ce tableau, on constate une modification de la distribution des tailles des grains. On remarque d'abord une augmentation du pourcentage des fines après ajout de 10% de concassés, ces fines passent de 19,1% pour la latérite crue à 21,4% pour le mélange à 10% de concassés. Après cela, une diminution progressive des fines est observée. Ces fines reviennent à 18,9% puis à 17,35%, à 20 et 30% de concassés de granite respectivement. Cette diminution des fines implique une réduction de la sensibilité à l'eau du matériau, et est due à l'ajout à des pourcentages assez élevés (20 et 30%) des particules contenant très peu de fines (5,5%). A 10% de concassés, le pourcentage des fines est supérieur aux exigences du CEBTP (20% de fines maximum), par contre les valeurs à 20 et 30% respectent les recommandations du CEBTP.

Les particules de grandes tailles quant à elle, diminue après ajout de 10% de concassés. Elles passent de 57,5% pour la latérite crue à 51,1% à l'ajout de 10% de concassés. Par la suite une augmentation progressive est observée, 53,7% puis 56,1% à l'ajout de 20 et 30% de concassés respectivement. Cette augmentation des particules grossiers induit un renforcement du squelette granulaire, et elle est due au fait que les concassés de granite sont en majorité constitués de particules grossiers (78,7%).

II-2- Limites d'Atterberg

La figure 23 regroupe les valeurs des différentes limites obtenues sur les mélanges de graveleux latéritique et de concassés de granite.

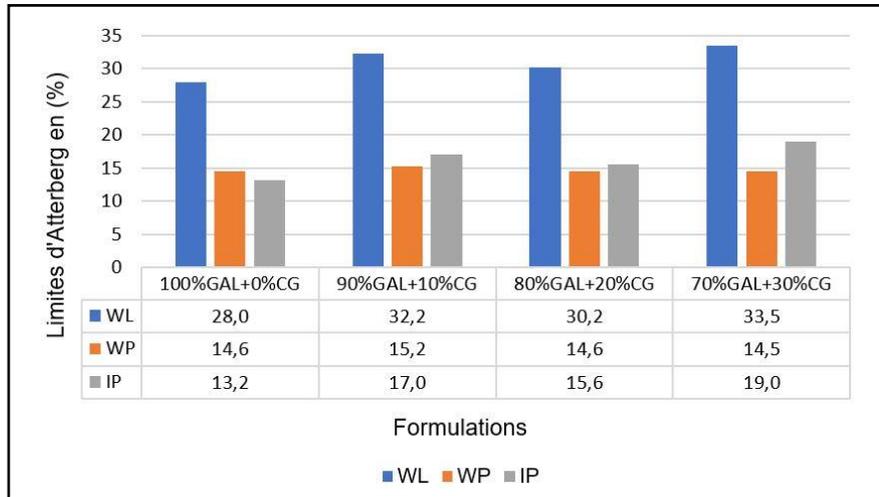


Figure 23: Limites d'Atterberg des différents mélanges

Interprétation : On constate que la limite de plasticité augmente à 10% (elle passe de 14,60% à l'état cru à 15,20% à l'ajout de 10% de concassés de granite). Cette augmentation est due à l'effet des fines. Les fines ont évolué de 19,1% à l'état naturel, à 21,4% à l'ajout de 10% de concassés de granite, ces fines retiennent beaucoup plus d'eau et ainsi, augmentent la plasticité du matériau. A l'ajout de 20% de concassés, la limite de plasticité décroît et l'on remarque aussi une diminution des fines. Cette décroissance est observée à 30% également. Les valeurs de ces limites sont passées de 15,20% à 14,6%, puis à 14,5% à l'ajout de 20 et 30% de concassés de granite respectivement, et les fines également ont diminués à 18,9%, puis à 17,35% à l'ajout de 20 et 30% de concassés de granite respectivement. Concernant l'indice de plasticité, on remarque qu'il augmente avec le pourcentage des concassés de granite, cette augmentation est en désaccord avec les résultats de l'analyse granulométrique, car les fines diminuent, et cette diminution des fines devrait induire une diminution de I_p qui augmente dans notre cas. Ainsi, on conclut que cela serait donc due, à un problème rencontré lors des essais, lors du processus d'échantillonnage. Les détails du calcul pour le mélange à 20% se trouvent en annexe 8.

II-3- Proctor Modifié

Les figures 24 et 25 présentent les résultats des teneurs en eau optimales et des densités sèches optimales respectivement, obtenues à différents pourcentages de concassés de granite de classe 0/31,5. Les détails du calcul pour le mélange à 20% se trouvent en annexe 9.

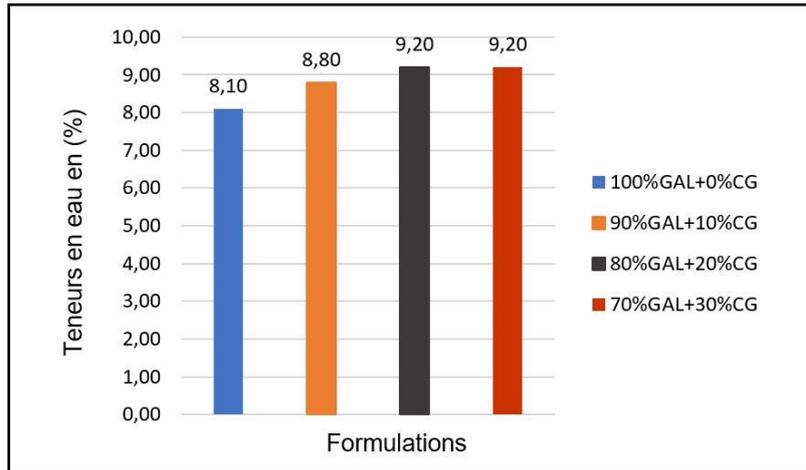


Figure 24: Teneurs en eau optimales des mélanges

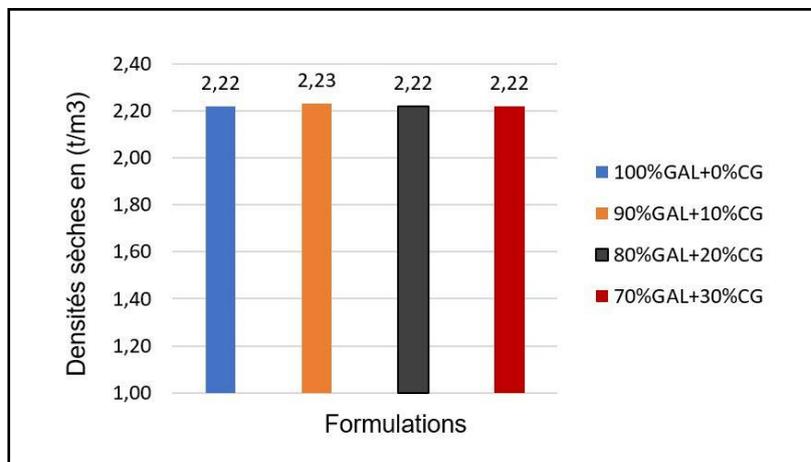


Figure 25: Densités sèches optimales des mélanges

La teneur en eau augmente au fur et à mesure que l'on ajoute des pourcentages plus élevés de concassés. Elle est passée de 8,80% à 9,20%, puis à 9,20% encore, après ajout de 10, 20 et 30% de concassés de granite respectivement. Cette augmentation de la teneur en eau serait due à une possible hétérogénéité lors de l'échantillonnage.

L'augmentation des pourcentages de granulats n'a pas eu d'effet sur les densités sèches. Elle est restée constante et égale à 2,22 t/m³.

II-4- CBR

Le CBR est à titre de rappel, l'élément principal de notre étude, l'objectif ici étant de proposer une formule de mélange de graveleux latéritique cru à des concassés de granite de classe 0/31,5, ayant un indice CBR à 98% de l'OPM supérieur ou égal à 110%. Ainsi, la figure 26 présente les résultats de l'essai CBR à 20% de concassés de granite qui a permis d'obtenir le meilleur résultat pour ce projet.

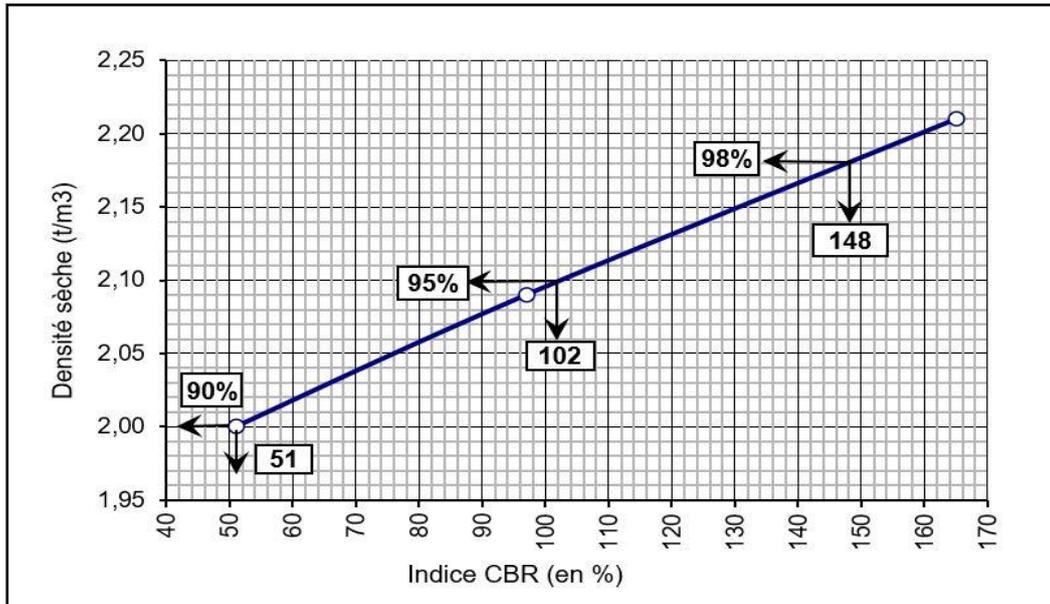


Figure 26: Paramètres CBR du mélange à 20% de concassés de granite

Le tableau 12 présente les indices CBR obtenus pour nos mélanges à pourcentages variables de 0/31,5 (0%, 10%, 20% et 30%), suivant les trois niveaux d'énergies de compactage. Les détails du calcul pour le mélange à 20% se trouvent en annexe 10.

Tableau 12: Paramètres CBR des mélanges

Pourcentage de concassés	0%	10%	20%	30%
CBR à 90% de l'OPM	34	43	51	50
CBR à 95% de l'OPM	67	77	102	104
CBR à 98% de l'OPM	94	103	148	172

Interprétation :

- ✓ CBR à 90% de l'OPM : On constate ici une évolution du CBR, qui passe de 34 pour le matériau cru à 43 pour le mélange à 10% de concassés de granite, puis à 51 pour 20% de concassés de granite. Cet indice n'a pas évolué suite à l'ajout de 30% de concassés de granite.
- ✓ CBR à 95% de l'OPM : Une évolution importante est observée à l'ajout de 20% de concassés de granite. Le CBR passe de 77 pour 10% de concassés de granite à 102 à l'ajout de 20%. Aucune variation n'est observée à l'ajout de 30% de concassés de granite.

- ✓ CBR à 98% de l'OPM : Le CBR continue d'évoluer au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage de concassés de granite. A 10% de concassés, la valeur obtenue est de 103. Une évolution intéressante est enregistrée à l'ajout de 20% de concassés de granite, soit un indice CBR de 148. A 30% de concassés, on constate que le CBR continue d'augmenter jusqu'à atteindre une valeur de 172.

II-5- Synthèse des résultats obtenus et choix de la formule adéquate

Le tableau 13 nous présente une synthèse des résultats obtenus lors des essais géotechniques effectués sur les différents mélanges de matériaux.

Tableau 13: Synthèse des résultats obtenus

Paramètres	Litho 10%	Litho 20%	Litho 30%	Exigences du projet ou du CEBTP
Passants au tamis de 80µm (%)	21,4	18,9	17,35	≤ 20%
Refus au tamis de 2mm (%)	51,1	53,7	56,1	
Indices de plasticité (%)	17	15,6	19	< 15%
Densités sèches maximales	2,23 t/m ³	2,22 t/m ³	2,22 t/m ³	
Indices CBR à 95% de l'OPM	77%	102%	104%	> 80%
Indices CBR à 98% de l'OPM	103%	148%	172%	≥ 110%

Interprétation : Les différents mélanges de matériaux répondent à certaines exigences, mais pas à d'autres. On remarque ici, que les indices de plasticité sont toutes supérieures à la valeur limite qui est de 15%, mais l'indice de plasticité à 20% de concassés de granite égal à 15,6%, est proche de la valeur limite. Les indices CBR à 95% de toutes les formulations répondent aux exigences du CEBTP en couche de base ; et à 98% les mélanges à 20% et à 30% de concassés répondent aux exigences du projet avec des valeurs de 148% et 172% respectivement. Ainsi pour ce projet, la formule à 20% de concassés sera retenue, donnant un indice CBR de 148 à 98% de l'OPM, car elle est celle qui répond le mieux aux exigences du projet, engendrant le coût le moins élevé.

III- Mise en œuvre de la couche de base litho-stabilisée sur l'avenue Mogho Naaba

Les travaux de laboratoire notamment les essais géotechniques, nous ont permis d'avoir différentes caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux à des proportions de 10, 20 et 30% de concassés de granite. La formule à 20% de concassés qui a été retenue dans le cadre de ce projet, et une bande d'essai de 100m a été réalisée tel qu'exigé par le CCTP.

III-1- Suivi d'exécution

Plusieurs étapes sont à respecter pour la mise en œuvre parfaite de la couche de base litho-stabilisée sur l'avenue Mogho Naaba. Ci-après, ces différentes étapes :

- ✓ Approvisionnement et étalement de la grave latéritique crue ;



Figure 27: Etalement de la grave latéritique crue

- ✓ Approvisionnement et étalement des concassés de granite sur la grave latéritique crue ;



Figure 28: Etalement des concassés de granite sur la grave latéritique crue

- ✓ Humidification du mélange à la teneur en eau spécifiée ;

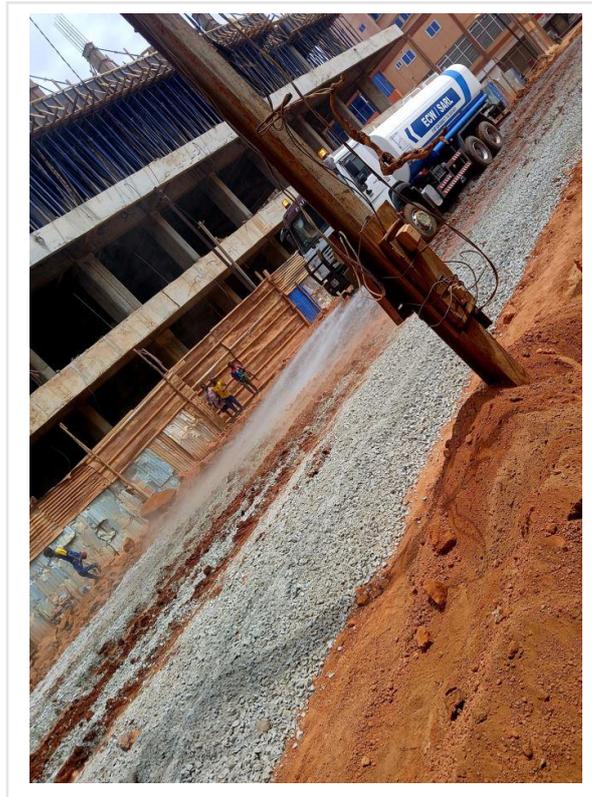


Figure 29: Humidification du mélange par une citerne à eau

- ✓ Scarification du mélange ;



Figure 30: Scarification du mélange par le scarificateur de la niveleuse

- ✓ Malaxage du mélange jusqu'à obtention d'un mélange homogène ;
- ✓ Compactage du mélange avec des compacteurs à pneu d'abord, et ensuite avec des compacteurs à rouleau, à l'énergie de compactage spécifiée ;



Figure 31: Couche de base après compactage

III-2- Contrôle de la conformité

III-2-1- Pendant la mise en œuvre

Pendant la mise en œuvre, plusieurs directives sont à respecter pour obtenir les résultats attendus. Parmi ces directives, nous avons :

- ✓ Le respect de la quantité d'eau à arroser afin d'atteindre la teneur en eau optimale ;
- ✓ L'homogénéité du mélange ;
- ✓ Le nombre de passes du compacteur nécessaires pour atteindre l'énergie de compactage adéquate.

Un échantillon du mélange est prélevé avant le compactage et amené au laboratoire pour des essais de contrôle. Ces essais de contrôle sont l'AG, les limites d'Atterberg, le Proctor modifié et le CBR. Ils permettront de vérifier la conformité des paramètres physiques et mécaniques obtenus sur le chantier, à ceux obtenus pendant les études. Les valeurs recherchées sont celles obtenues lors de la litho-stabilisation à 20% de concassés de granite pour les limites d'Atterberg et les paramètres du Proctor optimal. Pour les paramètres granulométriques, on fait une vérification en tenant compte des exigences du CEBTP, et pour le CBR, on se réfère au CCTP. Le tableau 14 illustre les résultats des essais de contrôle.

Tableau 14: Paramètres physiques et mécaniques après la mise en œuvre

Paramètres à contrôler						
	Passants au tamis de 80µm	Refus du tamis de 2mm	Limites d'Atterberg	Teneur en eau optimale	Densité sèche maximale	CBR à 98% de l'OPM
Résultats attendus	≤ 20%	20 à 50%	- W_L = 30,20% - W_P =14,60% - I_P =15,60%	9,20%	≥ 2,22 t/m ³	≥110%
Résultats obtenus	17,50%	55,2%	- W_L = 29,10% - W_P = 14,50% - I_P = 14,60%	9,30%	2,22 t/m ³	142%

Interprétation : Les résultats obtenus sont acceptables. Les fines restent inférieures à 20%, et une la densité sèche ne varie pas. Le CBR quant à lui est largement supérieur à la valeur recherchée.

III-2-2- Après la mise en œuvre

A cette étape, deux essais sont effectués. Il s'agit de :

- ✓ La mesure de la densité : l'essai au densitomètre à membrane est une méthode utilisée pour mesurer la densité in situ du sol. Cette méthode consiste à évaluer le volume d'une cavité creusée dans le sol, puis à comparer ce volume au poids du sol extrait afin de déterminer sa densité apparente.



Figure 32:l'essai au densitomètre à membrane

- ✓ La mesure de la déflexion : c'est une technique de mesure utilisée pour analyser le comportement mécanique d'une chaussée ou d'une plateforme sous l'influence d'une charge (un essieu de 13 tonnes), en quantifiant le déplacement vertical à un point donné. Ce déplacement est exprimé en centièmes de millimètres. Cet essai offre des données sur la portance, la rigidité et l'homogénéité de la structure. La mesure de la déflexion s'effectue à l'aide de la poutre de Benkelman comme présenté sur la figure 32. Il consiste à :
- Evaluer le déplacement vertical d'un point de la surface en réponse à une charge normalisée ;
 - Examiner la configuration (forme) du bassin de déflexion généré par cette charge, qu'elle soit fixe ou mobile ;
 - Etablir la capacité de la chaussée à supporter les charges de trafic à venir.

Au Burkina Faso, la valeur limite de la déflexion est fixée à 60 (1/100 mm) pour la couche de base. Dans notre cas, nous avons obtenu une valeur de déflexion $D=35,50$ (1/100 mm). Cette valeur reste inférieure à la valeur limite.

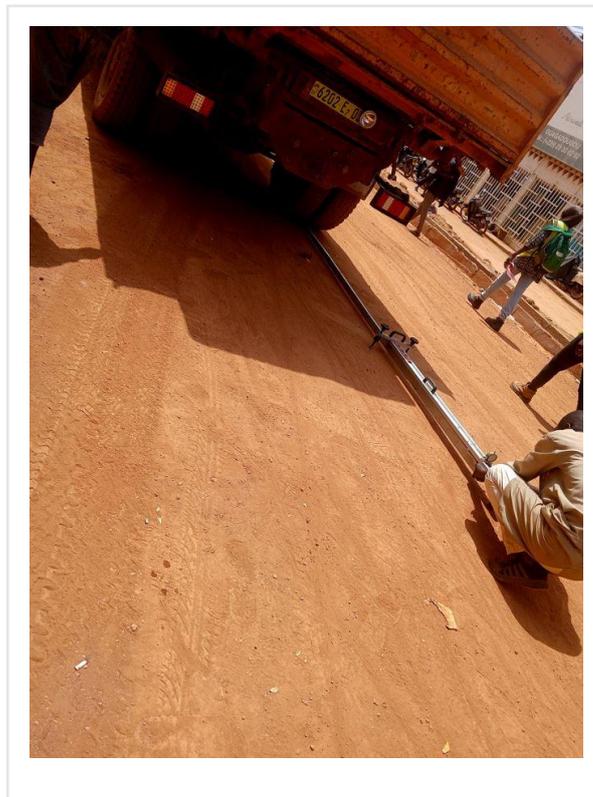


Figure 33: Mesure de la déflexion à l'aide de la poutre de Benkelman

Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats obtenus et leurs interprétations. On retient de ces résultats que notre graveleux latéritique à l'état naturel est une argile peu plastique contenant 19,1% de fines. Il est utilisable en couche de base car ses propriétés physiques répondent aux exigences du CEBTP. Néanmoins, certaines de ses propriétés mécaniques notamment le CBR, ne répondent pas aux spécifications du projet. Des lors, pour améliorer ces propriétés, nous avons caractérisé les concassés de granite, qui sont également acceptables en construction routière. Pour finir, des formules à 10, 20 et 30% ont été proposées, et celle à 20% de concassés a été retenue car elle répond le mieux aux exigences, avec un CBR de 148% à 98% de l'OPM. Sur la base du coût, elle est également la plus rentable. La couche de base a été réalisée, et les résultats des essais de contrôle sont satisfaisants.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était de déterminer la proportion de concassés de granite idéale pour répondre aux exigences du projet.

La première étape de notre travail a consisté à caractériser le graveleux latéritique de Yimdi. Nous avons analysé les propriétés physiques et mécaniques de ce graveleux en fonction des exigences du CEBTP. Il découle des essais effectués, que notre graveleux latéritique est une argile peu plastique d'après le diagramme de Casagrande. Il est utilisable en couche de base pour de faibles trafics, car ses propriétés physiques répondent aux exigences du CEBTP. Néanmoins, certaines de ses propriétés mécaniques notamment le CBR, ne répondent pas aux spécifications du projet. Ce qui nous a donc conduit à étudier son amélioration par ajout de concassées de granite.

La seconde étape de notre travail a donc été de caractériser les concassés de granite de classe 0/31,5 de Koubri. Il ressort que ces concassés sont utilisables en construction routière, car ils répondent aux exigences du CEBTP. Ils sont résistants vis-à-vis de leur coefficient Los Angeles qui vaut 21,7%, et leur forme est acceptable avec un coefficient d'aplatissement de 16,19%.

La troisième partie de notre étude a porté sur l'ajout de (10%, 20% et 30% de la masse sèche du graveleux latéritique) de concassés de granite dans la latéritique, et à l'évaluation de leurs effets sur les propriétés physico-mécaniques des mélanges, tout en faisant recours aux exigences du projet et à celles du CEBTP. Ces ajouts ont permis d'améliorer les propriétés de la GAL. Le mélange à 20% a été retenu pour ce projet, avec des propriétés très satisfaisantes. L'indice CBR donne une valeur de 148% à 98% de l'optimum Proctor. Malgré ce résultat satisfaisant à 20%, un mélange à 30% a été effectué afin de visualiser le comportement du matériau à ce pourcentage plus élevé. Il en découle de cela, que le CBR continue d'augmenter jusqu'à atteindre un indice de 172% à 98% de l'optimum Proctor.

La dernière partie de notre travail a consisté en la mise en œuvre de la couche de base litho-stabilisée. Des mesures ont été prises pendant cette opération afin de s'assurer de la qualité du travail effectué. Après la mise en œuvre, des essais (AG, limites d'Atterberg, Proctor Modifié, CBR, densitomètre à membranes, mesure de la déflexion) ont été effectués, et les résultats de ces essais sont en conformité avec ceux obtenus en laboratoire.

Perspectives et Recommandations

Au terme de cette étude, nous pouvons faire une proposition des perspectives suivantes :

- ✓ Ayant obtenu un indice CBR à 98% de l'OPM pour 20% de concassés très élevé par rapport aux exigences du projet, une formulation à 15% pourrait donner un résultat satisfaisant et à un coût moins élevé ;
- ✓ Lors du processus d'échantillonnage, une preuve de plus de rigueur est à observer, afin de garantir que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble ;
- ✓ Du point de vue des paramètres mécaniques, la considération des paramètres de compression et de cisaillement apporterait plus de précision. Ainsi, nous recommandons à l'entreprise de faire les essais de compression et de cisaillement direct ;
- ✓ Lors de la mise en œuvre (pendant le compactage), le respect de la liaison des bandes de compactage est recommandé, afin d'éviter les fissurations longitudinales à court et à long terme ;
- ✓ L'Énergie de compactage (le nombre de passe de l'engin) doit être respectée à la lettre, car une énergie inférieure à l'énergie optimale donnerait un mauvais compactage, et une énergie supérieure à celle optimale, augmenterait le pourcentage des fines.

Références

- Abdo, J., & Serfass, J. (2009). Terrassement et assises de chaussées : Traitement des sols aux liants hydrauliques. Collection Technique CIMBETON.
- Ahouet, L., & Elenga, R. G. (2019). Amélioration des propriétés géotechniques du graveleux latéritique par ajout de la grave alluvionnaire concassée 0/31, 5. *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 3(1), 1-6.
- Autret, P. (1980). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment. Thèse présentée à l'ENPC pour obtenir le diplôme de docteur ingénieur en génie civil.
- Autret, P. (1983). Latérites et graveleux latéritiques. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 38.
- Bagarre, E. (1990). Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. <https://trid.trb.org/view/1018608>.
- BALLA MENGUE André Parfait, ETUDE DE L'EFFET DE LA LITHOSTABILISATION SUR UN MATERIAU RECYCLE : CAS DES TRAVAUX DE LA ROUTE NATIONALE N°4 (BURKINA FASO). 2024.
- Bohi Z. P. B., « Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière: cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire) ».
- Bourgeon, G., & Gunnell, Y. (2005). La latérite de Buchanan. *Étude et gestion des sols*, 12(2), 87-100.
- De Medina J, and et al. 2006. "Etude du comportement thermique et électrique en modulation de fréquence d'une structure de chaussée à base de déchets de sacs en plastique broyés et de résidu de canne à sucre dans du mélange bitumineux pour une meilleure performance routière."
- Fasfox, « La structure de la chaussée routière ». Consulté le: 11 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.concretedispatch.eu/blog/structure-chaussee-routiere/>
- Fall, M. (1993). Identification et caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal : Application au domaine routier. <https://www.theses.fr/1993INPL119N>.
- Gidigas, M. D. (1976). Laterite soil engineering. *Development in geotechnical engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Gidigas, M. D. (2012). Laterite soil engineering : Pedogenesis and engineering principles (Vol. 9). Elsevier. <https://books.google.bf>.
- Houben, H., & Guillaud, H. (2006). CRATerre : Traité de Construction en Terre : L'encyclopédie de la construction en terre. Vol. I, Editions Parathèses, Marseille.
- Jjuuko, S., Kalumba, D., Bbira, S., & Bamutenda John Bosco. (2014). Blending of marginally suitable lateritic soils for use in base construction. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2366.4808>.
- Lcpc setra. 1994.
- Lompo, P. (1980). Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. Un matériau non traditionnel "Le lithostab". 4ème conférence routière africaine, Nairobi, Kenya, 20-25.
- Marie Therese Marame Mbengue, Caractérisation géo-mécanique des sols bruts et traités pour une meilleure utilisation en construction routière: cas des emprunts de Saaba et de Kamboinsé au Burkina Faso. 2023.
- Marie Viviane Wamanegba OUEDRAOGO, INFLUENCE DE L'AJOUT DE CONCASSES A DIFFERENTES CLASSES GRANULAIRES (0/31,5 ; 5/25 ;15/25) SUR LES PROPRIETES D'UN SOL LATERITIQUE : CAS DE LA ROCADE NORD DU BOULEVARD DES TANSOBA, BURKINA FASO. 2023.
- Mesbah, A., M. J. C., and O. M. 1999. "Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents."

- NF EN 933-3 «Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques de granulats» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1997.
- NF P 18-573 «Essai Los Angeles» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1990.
- NF P 84-504 «Echantillonnage» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1993.
- NF P 94-051 «Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle_Limite de plasticité au rouleau» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1993.
- NF P 94-056 «Analyse granulométrique» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1996.
- NF P 94-078 «Indice CBR après immersion_Indice CBR immédiat_Indice Portant Immédiat» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1997.
- NF P 94-093 «Détermination des références de compactage d'un matériau» Association Française de Normalisation (AFNOR). 1999.
- « Ouagadougou : Le ministère des Infrastructures lance les travaux de réhabilitation des avenues Yennega et du Mogho – La Tribune du Faso ». Consulté le: 10 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.latribunedufaso.net/?p=14287>
- Ouattara, M. A.-K. 2021. “Caractérisation géo mécanique de la latérite de Saaba (Burkina Faso) litho-stabilisation en vue d'une utilisation en construction routière.”
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, 104(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.003>.
- Wyss, U., & Sauret, H. (2007). Indicateurs de confort dans la technique de la voûte nubienne. Rapport intermédiaire.

Annexes

Annexe 1 : Analyse granulométrique de la GAL crue

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS

GAL crue

Date de prélevement :
 Date de l'essai :
 Lieu de prélevement : Avenue Mogho Naaba
 Opérateur : Dialum (Stagiaire)

Ouverture des tamis (mm)	Classe:				Classe:			
	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés
200								
160								
125								
100								
80								
63								
50								
40								
31,5								
25								
20		62	3,3	96,7				
16		116	6,2	93,8				
12,5		166	8,8	91,2				
10		266	14,2	85,8				
8		422	22,5	77,5				
6,3		586	31,3	68,7				
5		742	39,6	60,4				
4		868	46,3	53,7				
3,15		916	51,0	49,0				
2,5		1026	54,8	45,2				
2		1078	57,5	42,5				
1,6								
1,25		1170	62,4	37,6				
1		1202	64,2	35,8				
0,8		1234	65,9	34,1				
0,63		1268	67,7	32,3				
0,5		1296	69,1	30,9				
0,4		1322	70,6	29,4				
0,315		1364	72,8	27,2				
0,25		1384	73,9	26,1				
0,2								
0,16		1470	78,5	21,5				
0,125		1482	79,1	20,9				
0,1		1496	79,9	20,1				
0,08		1506	80,4	19,6				

Responsable de l'essai (nom et visa)

Mh : 4932
 MIs :
 Mh :
 Ms : $\frac{MIs \times Mh}{Mh}$: 1873
 Ms1 : 1514
 Rn = sn :

Tn : 4
 Validation
 $100 \text{ Ms1} - (Rn - Tn)$
 Ms1
 = < 2%
 W = 3,2%

Mh :
 MIs :
 Mh :
 Ms : $\frac{MIs \times Mh}{Mh}$:
 Ms1 :
 Rn = sn :

Tn :
 Validation
 $100 \text{ Ms1} - (Rn - Tn)$
 Ms1
 =

Annexe 2 : Limites d'Atterberg de la GAL crue

N° tare	Limite de liquidité					Limite de plasticité			
	72	3	8	4	10	63	61	11	60
Poids total humide (g)	13,00 g	12,60 g	12,10 g	0,00 g	0,00 g	6,90 g	5,30 g	0,00 g	0,00 g
Poids total sec (g)	10,10 g	9,90 g	9,60 g	0,00 g	0,00 g	6,10 g	4,70 g	0,00 g	0,00 g
Poids tare (g)	0,60 g	0,60 g	0,60 g	0,00 g	0,00 g	0,60 g	0,60 g	0,00 g	0,00 g
Poids de l'eau (g)	2,90	2,70	2,50			0,80	0,60		
Poids sec (g)	9,50	9,30	9,00			5,50	4,10		
Teneur en eau (g)	30,5%	29,0%	27,8%			14,5%	14,6%		
Nombre de coups N	15	20	25	0	0				

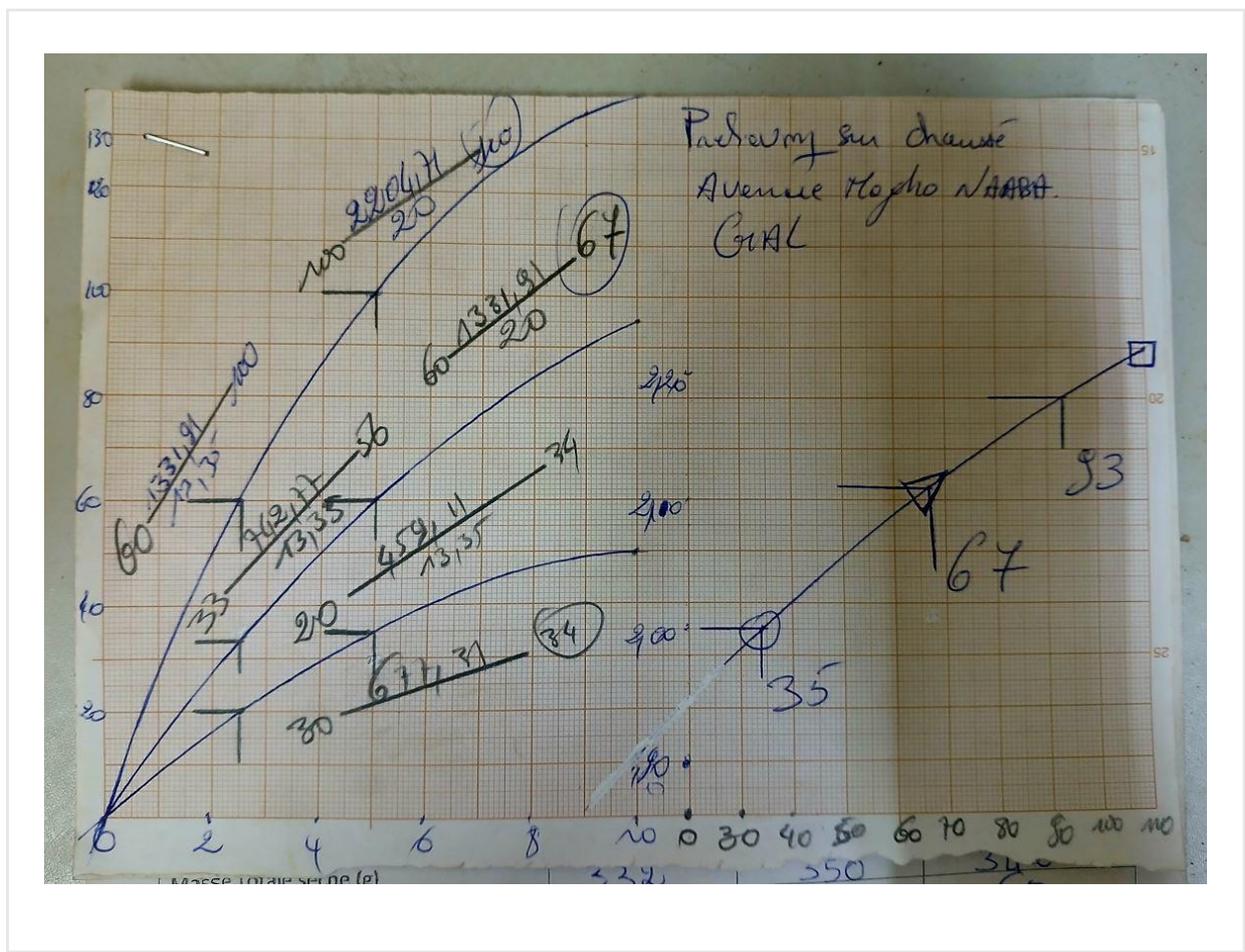
Annexe 4 : CBR de la GAL crue

		INDICE CBR APRES IMMERSION GAL crue		Référence Date	
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)					
Echantillon			Opérateur		
Identification		Nom & Prénom		Ibrahim (Aliou)	
Provenance		Date moulage			
Nature		Date essai			
Date réception		visa			
Installation et condition ambiantes			Equipements		
Lieu des essais		Moule	CBR		
		Dame	Manuelle		
Socle de compactage		Balance			
Séchage (NFP 94-050)		Etuve			
REFERENCES ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)		8,0	
		Densité		2,22	
INTENSITE DE COMPACTAGE		MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS	
Teneur en eau de moulage					
Numéro de Tare		B9	H5	G36	
Masse Totale humide (g)		352	374	366	
Masse Totale sèche (g)		332	350	342	
Masse de la tare (g)		62	54	60	
Masse d'eau (g)		20	24	24	
Masse du sol sec (g)		270	296	282	
Teneur en eau (%)		7,4	8,1	8,5	
Teneur en eau moyenne (%)			(8,0)		
Numéro de moule		1	G2	C5	
Densité de moulage					
Masse Totale humide (g)		10 832	10 441	8621	
Masse du moule (g)		5557	5391	3852	
Masse nette humide (g)		5275	5050	4769	
Volume du moule (cm ³)		2196	2225	2208	
Densité humide		2,40	2,27	2,16	
Densité sèche		2,22	2,11	2,00	
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau					
Numéro d'Identification du comparateur					
Lecteur (mm)					
Gonflement linéaire -G (%)					

	INDICE CBR APRES IMMERSION	Référence
		Date
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)		

ESSAI DE POINÇONNEMENT											
Installations et conditions ambiantes						Equipement					
Lieu des essais						Machine d'essai de Poinçonnement					
Période d'immersion						Anneau dynamométrique					
MOULAGE A (5x56 COUPS)				MOULAGE B (5x25 COUPS)				MOULAGE C (5x10 COUPS)			
Date d'essai		Date d'essai		Date d'essai		Date d'essai		Date d'essai		Date d'essai	
Teneur en eau		Teneur en eau		Teneur en eau		Teneur en eau		Teneur en eau		Teneur en eau	
Densité		Densité		Densité		Densité		Densité		Densité	
Surcharge		Surcharge		Surcharge		Surcharge		Surcharge		Surcharge	
E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)
0.1	03	2	48	0.1	02	2	22	0.1		2	
0.2	05	2.5	60	0.2	04	2.5	34	0.2		2.5	20
0.3	07	3	71	0.3	06	3	39	0.3		3	
0.4	11	3.5	80	0.4	07	3.5	49	0.4		3.5	
0.5	14	4	89	0.5	08	4	55	0.5		4	
0.6	16	4.4	96	0.6	08	4.5	60	0.6		4.5	
0.7	21	5	100	0.7	09	5	60	0.7		5	30
0.8	24	6	112	0.8	09	6	62	0.8		6	
0.9	26	7	121	0.9	10	7	64	0.9		7	
1	28	8	127	1	10	8	70	1		8	
1.25	31	9	136	1.25	11	9	84	1.25		9	
1.5	39	10	141	1.5	18	10	95	1.5		10	50
IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35				IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35				IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35			
IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20				IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20				IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20			
I CBR Immersion=				I CBR Immersion=				I CBR Immersion=			

TENEUR EN EAU APRES ESSAI						
Installations et conditions ambiantes				Equipements		
Lieu des essais				Balance		Etuve
Séchage (NFP 94-056)				Au moins 4h à ± 5°C		
	MOULAGE A (5x56COUPS) 1		MOULAGE B (5x25 COUPS) 62		MOULAGE C (5x10 COUPS)	
	Sur 2.5cm sup.	Sur matériau total	Sur 2.5cm sup.	Sur matériau total	Sur 2.5cm sup.	Sur matéri total
Numéro de tare		T3	1	BM		
Masse totale humide (g)		364		399		
Masse totale sèche (g)		330		354		
Masse la tare (g)		50		14		
Masse de l'eau (g)		34		45		
Masse du sol sec (g)		280		300		
Teneur en eau (%)		12,1		15,0		
Teneur en eau moyenne (%)						16,9



Annexe 5 : Analyse granulométrique des concassés de granite

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS

Concassés 0/32,5

Date de Prélèvement :
 Date de l'essai :
 Lieu de Prélèvement : Colonne de Kombi
 Opérateur : Ibrahim (stagiaire) Classe:
 Réf:

Ouverture des tamis (mm)	Classe: Réf:				Classe: Réf:			
	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés
200								
160								
125								
100								
80								
63								
50								
40								
31,5								
25		856	16,5	83,5				
20		1720	33,3	66,7				
16		2012	39,3	60,3				
12,5		2802	54,3	45,7				
10		3160	61,2	38,8				
8		3314	64,2	35,8				
6,3		3524	68,2	31,8				
5		3686	71,4	28,6				
4		3816	73,9	26,1				
3,15		3904	74,6	24,4				
2,5		3992	76,3	22,7				
2		4066	78,7	21,3				
1,6								
1,25		4198	81,3	18,7				
1		4242	82,2	17,8				
0,8		4288	83,1	16,9				
0,63		4334	83,9	16,1				
0,5		4380	84,8	15,2				
0,4		4420	85,6	14,4				
0,315		4472	86,6	13,4				
0,25		4534	87,8	12,2				
0,2								
0,16		4772	92	8				
0,125		4798	92,9	7,1				
0,1		4840	93,7	6,3				
0,08		4878	94,5	5,5				
Responsable de l'essai (nom et visa)	M1h : 460 M1s : Mh : Ms : $\frac{M1s \times Mh}{M1h}$: 160 M1 : 49,8 Rn = $\leq n$:		Tn : 36 Validation $100 Ms1 - (Rn - Tn)$ Ms1 = < 2% w = 0		M1h : M1s : Mh : Ms : $\frac{M1s \times Mh}{M1h}$: M1 : Rn = $\leq n$:		Tn : Validation $100 Ms1 - (Rn - Tn)$ Ms1 =	

Annexe 6 : Coefficient d'Aplatissement des concassés de granite

**PROPRETE ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE AVEC MESURE
DU COEFFICIENT D'APLATISSEMENT
NF EN 933-1 / NF EN 933-3 / NF P 18-561**

Dossier n°:		Date de prélèvement:		Client:		Lieu de prélèvement:	
Date d'essai:		Opérateur (*): <i>Ibrahim (Aliou)</i>		Référence d'échantillon: <i>CONCR 0/21,5</i>			
M 1 = g				M 2 = g			
Tamis (mm)	Grilles	Tamis		Grilles		Coefficient d'aplatissement partiel	% passant au tamis
		refus partiels Mg (g)	refus cumulés (g)	refus (g)	Passant (Me) (g)		
125							
100							
80							
63							
50	31,5						
40	25						
31,5	20	<i>418</i>			<i>29</i>		
25	16	<i>856</i>			<i>142</i>		
20	12,5	<i>854</i>			<i>85</i>		
16	10	<i>332</i>			<i>85</i>		
12,5	8	<i>210</i>			<i>130</i>		
10	6,3	<i>258</i>			<i>49</i>		
8	5	<i>156</i>			<i>33</i>		
6,3	4	<i>210</i>			<i>29</i>		
5	3,15	<i>162</i>			<i>26</i>		
4	2,5	<i>880</i>			<i>71</i>		
3,15							
2,5							
2							
1,6							
1,25							
1							
0,8							
0,63							
0,5							
0,4							
0,315							
0,25							
0,2							
0,16							
0,125							
0,1							
0,08							
M = <i>Me</i> = <i>3816</i> g		P (*) = g		EMe = <i>634</i> g			
Coefficient global d'aplatissement $A = \frac{EMe}{Me} \times 100 = \frac{634}{3816} \times 100 = 16,19\%$						Le responsable de l'essai (*):	
Propreté = $\frac{M1 - M2 - P}{M1} \times 100 = \dots$							
Validation = $100 \times \frac{M2 - (2Ri + P)}{M2} < 1\%$							
<i>Aliou Ibrahim</i>						(*) Nom et Visa	

Annexe 7 : Analyse granulométrique de la litho à 20%

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS

Litho 20%

Date de prélevement :
 Date de l'essai :
 Lieu de prélevement : Avenue Mogho Naaba -
 Opérateur : Ibrahim (stagiaire) Classe:
 Réf:

Ouverture des tamis (mm)	Classe:				Classe:			
	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés	Masse des refus partiels (g)	Masse des refus cumulés (g)	% des refus partiels	% tamisat cumulés
200								
160								
125								
100								
80								
63								
50								
40								
31,5								
25		56	2,8	97,2				
20		106	5,3	94,7				
16		164	8,2	91,9				
12,5		276	13,7	85,3				
10		362	18,0	82				
8		458	22,8	77,2				
6,3		588	29,3	70,7				
5		724	36,0	64				
4		854	42,5	57,5				
3,15		942	46,9	53,1				
2,5		1076	50,6	49,4				
2		1078	53,7	46,3				
1,6								
1,25		1186	59,0	41				
1		1226	61,0	39				
0,8		1266	63,0	37				
0,63		1306	65,0	35				
0,5		1344	66,9	33,1				
0,4		1382	68,8	31,2				
0,315		1420	70,7	29,3				
0,25		1458	72,6	27,4				
0,2								
0,16		1562	77,8	22,2				
0,125		1588	79,1	20,9				
0,1		1612	80,3	19,7				
0,08		1628	81,1	18,9				

Responsable de l'essai (nom et visa)

M1h : 2070

M1s :

Mh :

Ms : $\frac{M1s \times Mh}{M1h}$: 2008

Ms1 : 1,632

Rn = $\leq n$:

Tn : 4

Validation

$100 Ms1 - (Rn - Tn)$

Ms1

= < 2%

$CW = 3,12$

M1h :

M1s :

Mh :

Ms : $\frac{M1s \times Mh}{M1h}$:

Ms1 :

Rn = $\leq n$:

Tn :

Validation

$100 Ms1 - (Rn - Tn)$

Ms1

=

Annexe 8 : Limites d'Atterberg de la litho à 20%

N° tare	Limite de liquidité					Limite de plasticité			
	72	3	8	4	10	63	61	11	60
Poids total humide (g)	12,70 g	11,80 g	11,80 g	0,00 g	0,00 g	10,00 g	9,30 g	0,00 g	0,00 g
Poids total sec (g)	9,80 g	9,20 g	9,30 g	0,00 g	0,00 g	8,80 g	8,20 g	0,00 g	0,00 g
Poids tare (g)	0,60 g	0,60 g	0,60 g	0,00 g	0,00 g	0,60 g	0,60 g	0,00 g	0,00 g
Poids de l'eau (g)	2,90	2,60	2,50			1,20	1,10		
Poids sec (g)	9,20	8,60	8,70			8,20	7,60		
Teneur en eau (g)	31,5%	30,2%	28,7%			14,6%	14,5%		
Nombre de coups N	22	25	26	0	0				

Annexe 10 : CBR de la litho à 20%

		INDICE CBR APRES IMMERSION Litho 20%		Référence Date	
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)					
Echantillon			Opérateur		
Identification		Nom & Prénom		Dabini (Kaguisi)	
Provenance		Date moulage			
Nature		Date essai			
Date réception		visa			
Installation et condition ambiantes			Equipements		
Lieu des essais		Moule	CBR		
		Dame	Manuelle		
Socle de compactage		Balance			
Séchage (NFP 94-050)		Etuve			
		Au moins 4h à			
		105±5°C			
REFERENCES ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)		9,5	
		Densité		2,22	
INTENSITE DE COMPACTAGE		MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS	
Teneur en eau de moulage					
Numéro de Tare		DS	BB	A10 ⁺	
Masse Totale humide (g)		370	368	370	
Masse Totale sèche (g)		342	338	344	
Masse de la tare (g)		54	38	68	
Masse d'eau (g)		28	30	26	
Masse du sol sec (g)		288	300	286	
Teneur en eau (%)		9,7	10,0	9,4	
Teneur en eau moyenne (%)			9,7		
Numéro de moule		B5	B3	A6	
Densité de moulage					
Masse Totale humide (g)		10900	10560	8720	
Masse du moule (g)		5350	7424	3914	
Masse nette humide (g)		5350	7136	4806	
Volume du moule (cm ³)		2225	2243	2225	
Densité humide		2,40	2,29	2,16	
Densité sèche		2,21	2,09	2,00	
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau					
Numéro d'identification du comparateur					
Lecteur (mm)					
Gonflement linéaire -G (%)					

	INDICE CBR APRES IMMERSION	Référence
		Date
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)		

ESSAI DE POINÇONNEMENT											
Installations et conditions ambiantes						Equipement					
Lieu des essais						Machine d'essai de Poinçonnement					
Période d'immersion						Anneau dynamométrique					
MOULAGE A (5x56 COUPS) B5				MOULAGE B (5x25 COUPS) B3				MOULAGE C (5x10 COUPS)			
Date d'essai				Date d'essai				Date d'essai			
Teneur en eau				Teneur en eau				Teneur en eau			
Densité				Densité				Densité			
Surcharge				Surcharge				Surcharge			
E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)	E (mm)	F (div.)
0.1	01	2	16	0.1	02	2	32	0.1		2	
0.2	01	2.5	22	0.2	04	2.5	35	0.2		2.5	18
0.3	02	3	26	0.3	06	3	41	0.3		3	
0.4	03	3.5	34	0.4	08	3.5	49	0.4		3.5	
0.5	04	4	42	0.5	12	4	57	0.5		4	
0.6	05	4.4	48	0.6	14	4.5	64	0.6		4.5	
0.7	06	5	57	0.7	16	5	72	0.7		5	36
0.8	07	6	62	0.8	18	6	86	0.8		6	
0.9	08	7	71	0.9	22	7	98	0.9		7	
1	09	8	84	1	26	8	108	1		8	
1.25	10	9	96	1.25	28	9	120	1.25		9	
1.5	12	10	117	1.5	31	10	138	1.5		10	70
IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35				IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35				IP (2.5mm)= F (2.5mm) 13.35			
IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20				IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20				IP (2.5mm) = F (2.5mm) 20			
I CBR Immersion=				I CBR Immersion=				I CBR Immersion=			

TENEUR EN EAU APRES ESSAI						
Installations et conditions ambiantes				Equipements		
Lieu des essais				Balance		
Séchage (NFP 94-056)				Etuve		
Au moins 4h à ± 5°C				MOULAGE B (5x25 COUPS) B3		MOULAGE C (5x10 COUPS)
MOULAGE A (5x56 COUPS) B5						
Sur 2.5cm sup.	Sur matériau total	Sur 2.5cm sup.	Sur matériau total	Sur 2.5cm sup.	Sur matér total	
	K11		B55			
Masse totale humide (g)	370		359			
Masse totale sèche (g)	338		328			
Masse la tare (g)	33		30			
Masse de l'eau (g)	32		31			
Masse du sol sec (g)	305		298			
Teneur en eau (%)	10.5		12.1			14.9
Teneur en eau moyenne (%)						

