



AMELIORATION D'UN GRAVELEUX LATERITIQUE AU
CIMENT EN VUE D'UNE UTILISATION EN COUCHE DE
FORME POUR UNE CHAUSSEE AERONAUTIQUE : cas du
nouvel aéroport international de Ouagadougou-Donsin au
BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE : GENIE CIVIL – BATIMENTS ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le Jeudi 26 Janvier 2023 par :

Sylvie KOALA (20200063)

Directeur de mémoire : Mme GOMIS, enseignant en génie civil, Institut 2iE

Maître de stage : Abdramane Gouaklo KONE, Ingénieur Travaux, SOGEA SATOM

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Mamadou DIOP

Examineurs :

Dr Arnaud Louis Sountong-Noma OUEDRAOGO

M. Mamadou Pousga Junior KABORE

Promotion [2022/2023]

DEDICACES

Rien n'est plus beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du plus profond du cœur à ceux qu'on aime jusqu'aux frontières de l'imagination. Ce travail est dédié :

A DIEU le tout puissant pour sa miséricorde et sa protection

A mon cher père Pascal KOALA, pour son soutien indéfectible et les sacrifices considérables consentis dans l'investissement de mes études.

Que le seigneur vous comble de sa grâce et de sa bénédiction et vous accorde longue vie pour jouir des fruits de l'arbre que vous avez planté.

A ma très chère et tendre mère Flore Delphine KOALA/SANDWIDI pour tout son amour, son soutien, toutes les bénédictions.

Que le seigneur vous comble de sa grâce et de sa bénédiction et vous accorde longue vie pour jouir des fruits de l'arbre que vous avez planté.

A mon adorable fille Hosanna Marie-Viviane Ghislaine KOLA, ma boule d'énergie, pour son amour.

Que le seigneur te comble de grâce et de sa bénédiction et t'accorde une longue vie que tu grandisses en sagesse.

A mes sœurs (Micheline, Fabiola, Jedida) et petit frère (Tychique) pour leur amour, les encouragements perpétuels, le soutien moral, la joie qu'ils m'apportent.

Que le seigneur nous unisse toujours et qu'il montre à chacun de nous le chemin de l'amour.

A Ismael KOLA, pour les encouragements, la générosité

Que le seigneur te comble de grâces et te rende aux centuples tes bienfaits.

A toute ma famille paternelle et maternelle, pour leur attention particulière.

Que le seigneur veille toujours sur nous.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de :

- L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la formation de qualité et les compétences que j'ai acquises à l'issue de ce cycle d'ingénieur ;
- Mon Directeur de Mémoire, Madame Marie Thérèse GOMIS mon encadrant interne de mémoire pour son assistance, sa disponibilité et sa promptitude témoignée tout au long de ce tutorat.
- SOGEA SATOM Burkina à travers son Directeur d'Agence, M. Brice CHEVALLIER, pour cette opportunité qu'il m'a offerte d'effectuer le stage au sein de la structure. Je tiens également à remercier particulièrement le Directeur de Projet M. Boubacar TOURE, le Directeur de Travaux M. Prudence NOUNAGNON et le Chef du Laboratoire Géotechnique M. T. R. Henry NEMARO pour m'avoir accueilli sur le site des travaux et l'ensemble du personnel pour leur accueil chaleureux et pour leur sens de coopération ;
- Mon Maître de stage M. Abdramane KONE, pour sa disponibilité, ses interventions ;
- M. Ali SANA, pour ses inestimables conseils et réponses à mes préoccupations.
- M Isaac SOUGUE, pour les encouragements, les conseils, la disponibilité
- La banque mondiale qui m'a permis de faire mes études de Master à l'Institut 2iE à travers la bourse.
- Tous mes amis et camarades pour leur soutien moral, affectif et l'ambiance fraternelle.

RESUME

Les graves latéritiques sont des matériaux couramment utilisés en construction routière au BURKINA FASO. Elles constituent le corps des chaussées souples en couche d'assise et/ou couche de forme. Plusieurs emprunts de graves latéritiques sont disponibles mais ne peuvent être utilisés à l'état brut, d'où la nécessité d'améliorer leurs propriétés. En géotechnique routière, il existe plusieurs techniques de stabilisation des sols regroupés en deux grandes catégories qui sont la stabilisation chimique et la stabilisation mécanique. Dans notre cas, nous avons opté pour la stabilisation chimique spécialement le traitement au ciment, technique consistant à incorporer dans le sol un liant hydraulique routier afin d'augmenter sa résistance. Des essais de laboratoire ont préalablement été réalisés sur le graveleux latéritique à l'état naturel. Il s'agit de l'analyse granulométrique, des limites d'Atterberg, de l'essai Proctor Modifié et de l'essai CBR.

Le matériau a donc été amélioré au ciment avec différents pourcentages (1, 1,5 et 2%) afin d'observer l'évolution de l'indice CBR. L'indice portant CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié passe de 50% à l'état naturel à 100%, 125% et 159% après ajout de 1%, 1,5% et 2% de ciment respectivement.

Des essais de contrôle de la qualité ont été réalisés sur le matériau amélioré in-situ. Nous avons effectué les essais tels que l'essai de compacité au gammadensitomètre, l'essai de portance module EV2 sous le chargement statique, l'essai de compression simple, de traction indirecte. La résistance à la compression R_c moyenne à 7 jours a donné **2,25 MPa** et la résistance à la traction R_t moyenne à 7 jours **0,38 MPa**. Les valeurs obtenues des essais de résistance à la compression et traction sont conformes au CEBTP. Le module EV2 moyen à 7 jours a donné **229 MPa**.

Nous retenons que l'amélioration à 2% de ciment donne les résultats conformes aux spécifications du cahier de prescription technique.

Mots-clés :

- 1- Chaussée aéronautique**
- 2- Couche de forme**
- 3- Grave latéritique**
- 4- Ouagadougou-Donsin**
- 5- Traitement au ciment**

ABSTRACT

Lateritic gravels are materials commonly used in road construction in Burkina Faso. They constitute the body of flexible pavements in base course and/or subgrade. Several borrowed lateritic gravels are available but cannot be used in their raw state, hence the need to improve their properties. In road geotechnics, there are several soil stabilization techniques grouped into two main categories: chemical stabilization and mechanical stabilization. In our case, we opted for the chemical stabilization especially the cement treatment, technique consisting in incorporating in the soil a hydraulic road binder in order to increase its resistance.

Laboratory tests were previously carried out on the lateritic gravel in its natural state. These tests included particle size analysis, Atterberg limits, the Modified Proctor test and the CBR test.

The material was therefore improved with cement with different percentages (1, 1.5 and 2%) to observe the evolution of the CBR index. The 95% CBR value of the Modified Proctor Optimum increases from 50% in its natural state to 100%, 125% and 159% after the addition of 1%, 1.5% and 2% cement respectively.

Quality control tests were performed on the improved material in-situ. We performed the tests such as gammadensitometer compaction test, EV2 modulus bearing test under static loading, simple compression test, indirect tensile test. The average 7-day compressive strength R_c was 2.25 MPa and the average 7-day tensile strength R_t was 0.38 MPa. The values obtained from the compressive and tensile strength tests are in accordance with CEBTP. The average EV2 modulus at 7 days gave 229 MPa.

We retain that the improvement with 2% cement gives results in accordance with the specifications of the technical specifications.

Keywords :

- 1- Aeronautical pavement
- 2- Subgrade
- 3- Lateritic gravel
- 4- Ouagadougou-Donsin
- 5- Cement treatment

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

APD Avant-Projet Détaillé

CBR California Bearing Ratio

CEBTP Centre expérimental de Recherches et d'Etudes du bâtiment et des Travaux Publics

CEDEAO Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CPA Ciment Portland Artificiel

CPT Cahier de Prescription Technique

GAL Grave Argileuse Latéritique

GTR Guide de terrassement Routier

HRB Highway Research Board

HSE Hygiène Santé Environnement

IATA Association du Transport Aérien International

IST Infections Sexuellement Transmissible

MDC Mission de Contrôle

MOAD Maitrise d'Ouvrage de l'Aéroport de Donsin

NF Norme Française

OACI Organisation de l'aviation Civile Internationale

OPM Optimum Proctor Modifié

PAQ Plan d'Assurance Qualité

PASS Permanence d'Accès aux soins de Santé

PGES Plan de Gestion Environnemental et Social

PST Partie Supérieure des Terrassements

VRD Voiries et Réseaux Divers

SETRA Services d'Etudes Technique des routes et Autoroutes

SOGEA SATOM Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

SOMMAIRE

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : GENERALITE	2
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL	2
1. Historique de SOGEA-SATOM	2
2. Fiche d'identification de SOGEA SATOM BURKINA	2
3. Domaine d'activités	2
4. Principaux clients de SOGEA SATOM.....	3
5. Organisation.....	3
II. PRESENTATION DU PROJET	4
1. Présentation de la zone d'étude.....	4
2. Contexte du projet.....	5
3. Justification du projet.....	5
4. Présentation du nouvel aéroport.....	5
5. Objectif du projet	7
6. Présentation du cadre d'étude	7
7. Méthodologie de conception.....	8
CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	11
I. GENERALITE DES CHAUSSEES AERONAUTIQUES.....	11
1. Les différentes couches d'une chaussée.....	12
2. Les différents types de structures de chaussées aéronautiques	13
II. GENERALITE SUR LE GRAVELEUX LATERITIQUE.....	14
III. LES TECHNIQUES DE STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE	15
1. Stabilisation chimique.....	16
2. Stabilisation mécanique	18
IV. MATERIELS ET METHODES.....	19
1. Echantillonnage (NF P 18-553 et NF EN 932-1).....	20
2. Essais géotechniques réalisés.....	20
CHAPITRE 3 : ETUDE AU LABORATOIRE	31
I. RESULTATS DE ESSAIS REALISES SUR LA GRAVE LATERITIQUE.....	31
1. L'analyse granulométrique (Tamisage) NF P 98 232-1.....	31
2. Etats de consistance -Limites d'Atterberg NF P 94-051.....	32

3.	Essai Proctor NF P 94 093	33
4.	Essai CBR à 4 jours d'immersion NF P 94 078.....	34
II.	RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LE GRAVELEUX LATERITIQUE AMELIORE AU CIMENT	36
1.	Résultats	36
2.	Interprétations des résultats.....	38
CHAPITRE 4 : LA TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN		42
I.	MISE EN OEUVRE	42
1.	Ressources.....	42
2.	Méthodologie de mise en œuvre	43
II.	CONTROLE DE LA QUALITE	46
1.	Contrôle de la compacité NF P94-061-1.....	46
2.	Contrôle de la portance de la plateforme : module EV2 sous le chargement statique NF P 94-117-1	46
3.	Contrôle de la portance CBR à 3jrs à l'air libre et 4jrs d'immersion.....	48
4.	Contrôle de la résistance à la compression simple NF EN 13286-50	48
5.	Contrôle de la résistance à la traction indirecte NF EN 13286-42.....	49
CONCLUSION.....		50
BIBLIOGRAPHIE.....		51

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de SOGEA SATOM sur le site de Donsin (Source : SOGEA SATOM)	3
Figure 2: Localisation de la zone d'influence du projet	4
Figure 3: Caractéristiques de la chaussée aéronautique du projet.....	8
Figure 4: Coupe type d'une structure de chaussée.....	13
Figure 5: Graveleux latéritique de l'emprunt	15
Figure 6: Ciment utilisé sur le chantier	19
Figure 7: Echantillonnage du matériau provenant de l'emprunt	20
Figure 8: Matériels pour l'essai d'analyse granulométrique	21
Figure 9: Matériels pour l'essai de limites d'Atterberg	23
Figure 10: Matériau pesé et mis dans des tares pour l'essai Proctor	24
Figure 11: Moules CBR plongés dans un bac plein d'eau et appareil pour le poinçonnement	25
Figure 12: Eprouvettes confectionnées et conservées dans du sachet plastique	26
Figure 13: Exécution de l'essai de compression simple avec la presse hydraulique.....	28
Figure 14: Illustration de l'exécution de l'essai de traction indirecte avec la presse hydraulique	29
Figure 15: Courbe granulométrique du graveleux latéritique cru	31
Figure 16: Courbe de limites d'Atterberg.....	32
Figure 17: Courbe de l'essai Proctor modifié du matériau cru.....	33
Figure 18: Courbe CBR du graveleux latéritique cru	34
Figure 19: Courbe Proctor modifié du graveleux amélioré à 1% ciment.....	36
Figure 20: Courbe Proctor modifié du graveleux amélioré à 1,5% ciment.....	37
Figure 21: Courbe Proctor modifié du graveleux amélioré à 2% ciment.....	37
Figure 22: Courbe de variation de la densité sèche en fonction de la teneur en ciment	38
Figure 23: Courbe de variation de la teneur en eau en fonction de la teneur en ciment	39
Figure 24: Courbe d'évolution du CBR en fonction de la teneur en ciment	40
Figure 25: Illustration du traçage des mailles pour le dosage en ciment et étalage du ciment	44
Figure 26: malaxage du matériau à de la recycleuse connectée à un camion-citerne	44
Figure 27: compactage et nivellement de la couche de forme après malaxage	45
Figure 28: l'appareil Troxler utilisé pour l'essai de compacité sur le sol-ciment.....	46
Figure 29: Réalisation de l'essai de portance sur le sol-ciment.....	47

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Les spécifications du cahier technique pour le matériau cru	31
Tableau 2: Résultats de l'essai Proctor du graveleux latéritique	34
Tableau 3: Synthèse des résultats d'essais d'identification du matériau cru.....	35
Tableau 4: Synthèse des résultats de l'essai Proctor modifié du graveleux amélioré au ciment.....	38
Tableau 5: Résultats de l'essai de compacité avec le Troxler.....	46
Tableau 6: Résultats de l'essai de portance module EV2.....	47
Tableau 7: Résultats de l'essai Proctor modifié du graveleux amélioré in-situ.....	48
Tableau 8: Résultats de l'essai de compression simple du graveleux amélioré au ciment in-situ.....	48
Tableau 9: Résultats de l'essai de traction indirecte du graveleux amélioré au ciment in-situ	49

INTRODUCTION

Les infrastructures de transport sont les principaux moyens d'échange et de communication des populations et biens entre les villes et les pays. Elles jouent un rôle primordial dans le développement des activités économiques, sociales et culturelles des pays. Le BURKINA FASO, pays sahélien enclavé situé au cœur de l'Afrique de l'ouest, joue un rôle important dans l'organisation des flux des personnes et des marchandises de par sa position géographique. L'un des principaux liens entre ce pays et le reste du monde est le transport aérien.

L'actuel aéroport de Ouagadougou qui se situe en plein cœur de la ville est source de nuisance et de pollution et présente d'une part un problème de sécurité pour la population avoisinante. D'autre part, il présente des limites d'extension de la piste et des installations terminales. Conscient de cela, le gouvernement Burkinabé qui veut améliorer ses infrastructures de transport à travers son Programme des Transports et du Tourisme (PST-2) a initié en 2011 la délocalisation de l'actuel aéroport de Ouagadougou vers Donsin distant d'une trentaine de kilomètres de la ville afin de résoudre ces différents problèmes. Le projet de construction du nouvel aéroport qui est subdivisé en plusieurs sous-projets comprend la construction de bâtiments, d'infrastructures aéroportuaires et d'une base militaire.

Le présent mémoire de fin d'études dont le thème est : « **Amélioration d'un graveleux latéritique au ciment en vue d'une utilisation en couche de forme pour une chaussée aéronautique : cas du nouvel aéroport international de Ouagadougou-donsin au BURKINA FASO** » s'inscrit dans le cadre des travaux de construction de la piste d'atterrissage/décollage qui fait partie des infrastructures aéroportuaire.

L'objet de notre travail est de proposer la formulation optimale permettant d'aboutir à un mélange ciment-latérite en couche de forme ayant un module de déformation EV2 supérieur ou égale à 230 MPa après mise en œuvre.

Pour mener ainsi à bien notre étude et atteindre les objectifs fixés, ce travail sera subdivisé en quatre chapitres. Le chapitre 1 est consacré à la Généralité, nous présenterons la structure d'accueil, le projet et le cadre de l'étude ; le chapitre 2 à la revue bibliographique présente les généralités sur la chaussée aéronautique, les graves latéritiques, et les techniques de stabilisation au ciment ; le chapitre 3 à l'étude au laboratoire, nous exposerons les résultats des essais de caractérisation physique et mécanique de la grave latéritique naturelle et améliorée et le chapitre 4 à la mise en œuvre et à la vérification in-situ, nous présenterons la procédure d'exécution et les résultats des essais de portance.

CHAPITRE 1 : GENERALITE

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1. Historique de SOGEA-SATOM

La société SOGEA STAOM est née de la fusion en 2001, de la société SOGEA, présente au Maroc depuis les années 1930 puis dans les années cinquante au Gabon, Niger et le Tchad et la société SATOM, filiale africaine de la société SAINRAPT et BRICE, présente en Afrique depuis 1951 par le rachat de travaux Afrique puis par l'absorption, dans les années soixante-dix, de SOFRATOM.

Ancré historiquement à travers son réseau de filiales et succursales implantées dans une vingtaine de pays (Cameroun, Gabon, Congo Brazzaville, Tchad, Niger, Guinée, Burkina Faso, Mali, Maroc, Benin, Togo, ...). SOGEA SATOM est un opérateur stable et permanent en Afrique et est une entité de Vinci Construction (un des quatre grands pôles du groupe Vinci) depuis 2001.

Elle est dirigée à ce jour par un Directeur Général de la Société SOGEA SATOM et membre du CODOR de Vinci construction. La section territoriale SOGEA SATOM BURKINA FASO est dirigée par un Directeur d'Agence.

2. Fiche d'identification de SOGEA SATOM BURKINA

Ville : Ouagadougou

Adresse postale : 01 BP 571 OUAGADOUGOU

Siège territorial : Zone Industrielle de Gounghin

Téléphone : 00226 25 34 28 31

E-mail : sogeasatombf@vinci-construction.com,

3. Domaine d'activités

SOGEA SATOM est spécialisée dans les études et la réalisation d'infrastructures de transport, d'ouvrages de génie civil, de bâtiments et de complexes industriels, d'ouvrages hydrauliques, de réseau d'assainissement, de station de traitement des eaux. Ses domaines de compétences couvrent :

- Les terrassements en grande et petite masse : route, autoroutes, barrages, périmètres agricoles, lotissements, voiries ;
- Les chaussées routières, portuaires et aéroportuaires, les voies ferrées et les VRD ;
- Le génie civil : ouvrages d'art, murs de soutènement, quais, digues réservoirs, stations d'épuration et traitement des eaux, cimentiers, ... ;
- Bâtiments à usage d'habitations, de bureaux et industriels,

- Hydraulique : prise d'eau, adduction, assainissement, traitement des eaux

4. Principaux clients de SOGEA SATOM

Les clients de la société SOGEA SATOM sont principalement :

- Les Etats africains ou leurs Administrations, les sociétés publiques, les collectivités
- Les clients et Opérateur privée africains ou internationaux.

5. Organisation

Les chantiers de SOGEA SATOM sont bien organisés afin de mieux réaliser les travaux. La Figure 1 présente l'organigramme de SOGEA SATOM dans le cadre de la réalisation des travaux de construction de chaussées aéronautiques (lot 2) sur le site du nouvel aéroport international de Ouagadougou – Donsin.

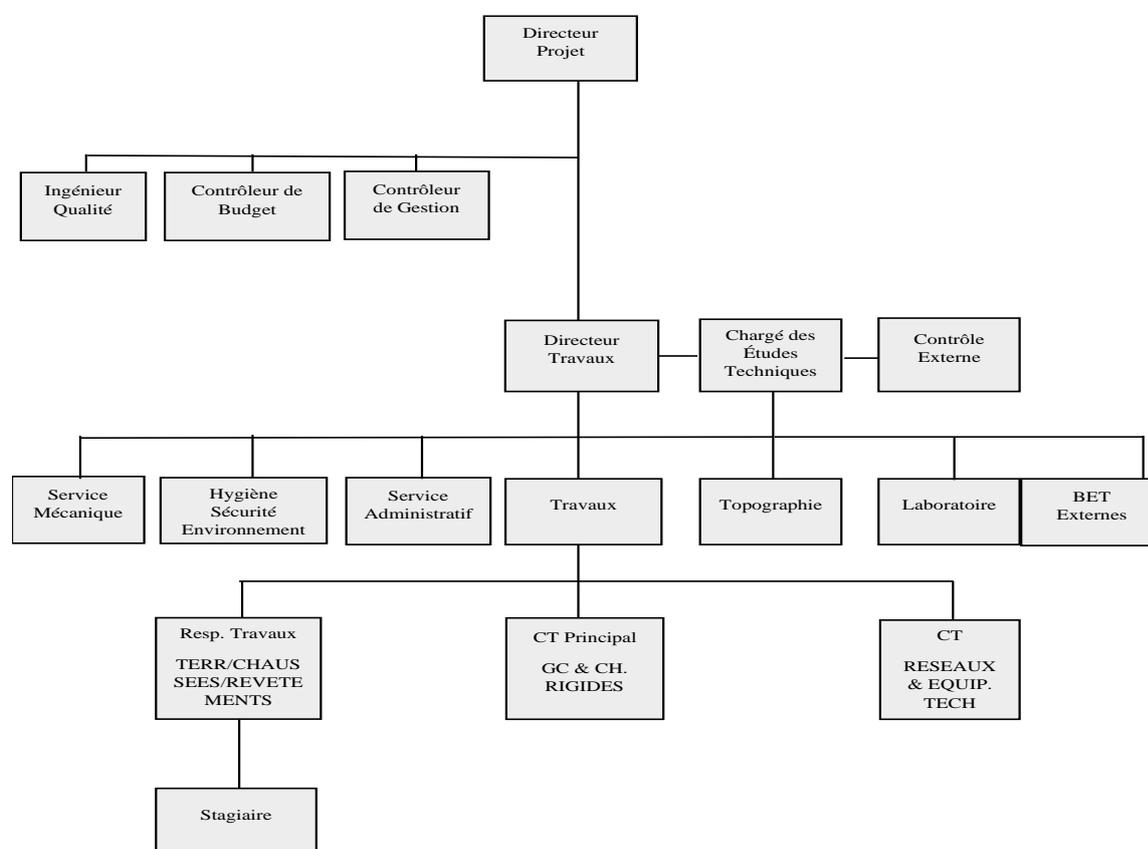


Figure 1: : Organigramme de SOGEA SATOM sur le site de Donsin (Source : SOGEA SATOM)

II. PRESENTATION DU PROJET

1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude du projet illustrée par la Figure 2, appartient à la région naturelle du plateau Mossi du domaine climatique soudano-sahélienne. Le projet de construction du nouvel aéroport de Ouagadougou est localisé à 35 km au nord-est de Ouagadougou et à 16 km à l'ouest de Ziniaré. Situé entre la latitude 12°35'20.71" Nord et longitude 01°27'07.04" Ouest, il est complètement inclus dans la province d'Ouhritenga de la région du Plateau central. La zone d'emprise couvre une superficie d'environ 4400 ha. Les villages comme Loumbila, Tabtenga, Rogommogo, Nongstenga, Kogninga, Kartenga, Donsin, Taonsgo, Silliougou, Kouri sont inclus en totalité ou partiellement dans ce périmètre. Le milieu agricole occupe la majorité du territoire avec principalement des cultures pluviales. Au travers, on retrouve des savanes arbustives, les seuls espaces naturels encore présents. L'habitat est rural et la zone n'est pas lotie. Les activités économiques sont dominées par l'agriculture vivrière. Les ressources en eau sont moyennes et proviennent essentiellement des eaux de surface. Seul le réservoir (barrage) de Loumbila, qui alimente Ouagadougou, constitue le plan d'eau permanent de la zone.

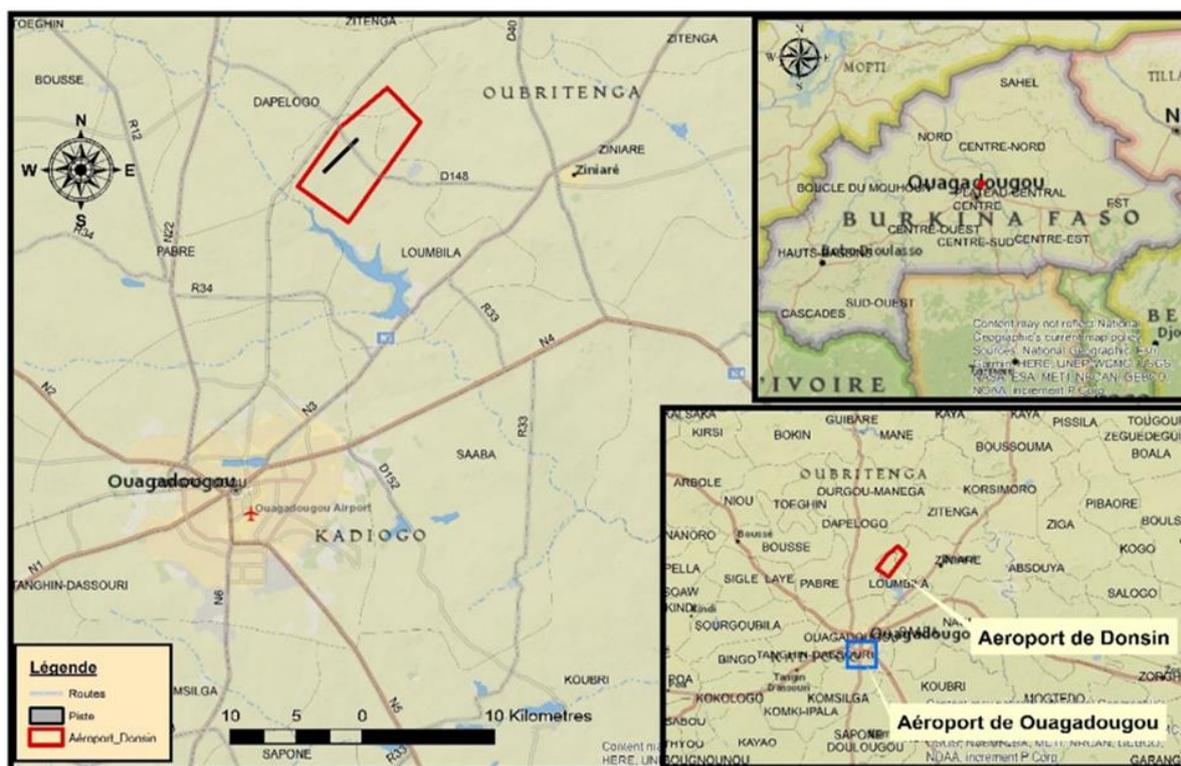


Figure 2 : Localisation de la zone d'influence du projet

2. Contexte du projet

Le Burkina Faso est un pays continental. Sa position centrale en Afrique de l'Ouest pourrait être exploitée comme atout pour son développement socio-économique. Pour cette raison le Gouvernement du Burkina-Faso projette de construire un nouvel aéroport, près de la localité Donsin à environ 35 km de l'emplacement de l'aéroport actuel.

Le site retenu pour la construction de l'aéroport s'étend sur une superficie d'environ 4400 hectares.

3. Justification du projet

Dans sa position géographique actuelle, l'aéroport international de Ouagadougou se retrouve au centre de développement urbain. En plus d'être une infrastructure source de nuisance, sa situation géographique engendre non seulement les problèmes de sûreté et de sécurité, mais annihile également les possibilités d'extension des installations terminales, qui doivent être régulièrement adaptées à la croissance du trafic aérien.

Donc devant ces multiples problèmes, le gouvernement du BURKINA FASO souhaite se doter d'un nouvel aéroport moderne et sécuritaire qui sera conforme aux standards internationaux et créer l'espace nécessaire pour une croissance future.

4. Présentation du nouvel aéroport

Les travaux de création de chaussées aéronautiques comprennent : une piste de 3500m de longueur et de 45m de largeur, avec des accotements de 15m de part et d'autre dont un élargissement structurel de 7,5m sur la bande la plus proche de l'axe. Une voie de circulation parallèle à la piste de 3500m de longueur et de 23m de largeur, ainsi que ses accotements, les quatre (04) bretelles de connexion entre la piste et la voie de circulation parallèle et l'aire de stationnement isolée, des aires de stationnement commerciale présidentielle, militaire, isolée, pour le fret avec une zone dédiée aux essais moteurs, pour l'aviation générale ; pour la maintenance et les passagers. (Annexe 01).

Le projet de construction du nouvel aéroport international est divisé en deux phases et une extension.

- L'étape 1 prévoit l'implantation d'une piste de 3500m et la construction par phases, au fur et à mesure des besoins, des installations nécessaires à l'exploitation de l'aéroport.
- L'étape 2 sera éventuellement envisagée dans 25ans et comprendrait l'ajout d'une deuxième piste, de même longueur et parallèle à la première, et de quelques bâtiments complémentaires.

- Une extension 500 m de l'une ou des deux pistes sera éventuellement nécessaire pour accueillir de gros porteurs (Airbus 380).

La construction du nouvel aéroport est un projet dans lequel sont logés plusieurs sous projets que sont :

- Accès routier au nouvel aéroport de Donsin ;
- Gestion environnementale et sociale du projet du nouvel aéroport de Donsin ;
- Plateforme aéroportuaire de Donsin ;
- Base militaire de l'aéroport de Donsin ;
- Raccordement de la plateforme aéroportuaire de Donsin aux réseaux d'eau potable, d'électricité et à la fibre optique ;
- Aménagement urbain de la zone d'influence de l'aéroport de Donsin.

Pour une bonne organisation et coordination, le projet a été divisé en plusieurs lots.

Les infrastructures

Lot 2A : Chaussées aéronautiques

Lot 2B : Clôture domaniale

Lot 3.1 : Voiries et Réseaux Divers coté ville

Lot 3.2 : Réseaux d'eau potable et sécurité incendie

Lot 4 : Centrales et distribution électrique

Lot 5 : Télécommunications coté ville

Les bâtiments

Lot A1 : Bâtiments techniques

Lot A2 : Équipements aéronautiques et météorologiques

Lot B : Bâtiments administratifs

Lot D : Pavillons présidentiel et ministériel

Lot E : Hangars

Lot F : Aérogares passagers, affaires et aéroclub

Lot G : Logistiques

Lot H : Maison du Hadj

La base militaire

M1 : Voiries et assainissement, réseau d'eau potable et éclairage

M2 : Hangars militaires M3 : Bâtiment de commandement et d'administration, centrale électrique

M4 : Logements militaires

5. Objectif du projet

Du point de vue des objectifs, le projet de construction de l'aéroport de Ouagadougou-Donsin et de ses voies d'accès vise à :

- Améliorer la sécurité et la sûreté des activités aéronautiques en les délocalisant hors de la ville de Ouagadougou et optimiser la mise aux normes de l'OACI, de l'IATA et de la CEDEAO de la nouvelle plateforme aéroportuaire ;
- Assurer un meilleur fonctionnement du centre-ville et une meilleure liaison avec les quartiers-sud de la capitale ;
- Améliorer la qualité de vie dans la ville de Ouagadougou par la baisse de la pollution, du niveau sonore et l'amélioration de la fluidité du trafic
- Lutter efficacement contre la pauvreté en créant des emplois pendant et après l'exécution des travaux ;
- Contribuer à une augmentation des recettes de l'État par les taxes et impôts qui seront générés par la commercialisation et la mise en valeur du site de l'actuel aéroport ;
- Assurer un meilleur rayonnement du Burkina Faso dont la position centrale au cœur de la CEDEAO est propice à lui faire jouer un rôle de hub du trafic aérien régional et international.

6. Présentation du cadre d'étude

a. Caractéristiques de la chaussée aéronautique

La chaussée aéronautique projetée sur la Figure 3 est de type souple et elle se présente comme suit :

- Une couche de revêtement en Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME) de classe 3 d'épaisseur 6 cm
- Une couche de base en Grave Bitume (GB) de classe 4 d'épaisseur 14 cm
- Une couche de fondation en Grave Non Traité (GNT) 0/31.5 d'épaisseur 20 cm
- Une couche de forme en Grave latéritique améliorée au ciment d'épaisseur 25 cm

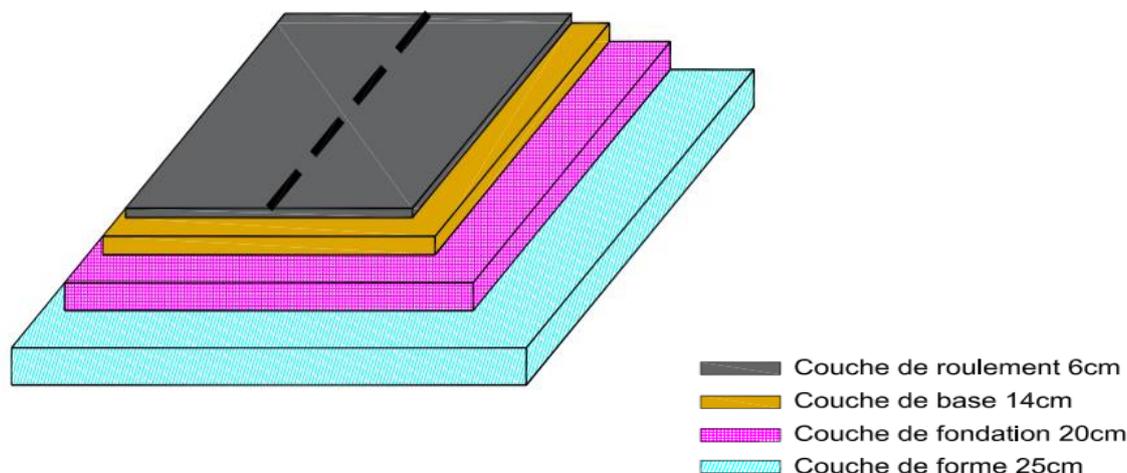


Figure 3: Caractéristiques de la chaussée aéronautique du projet

b. Cadre logique de l'étude

✚ Objectif global

L'objet de notre travail est de proposer la formulation optimale permettant d'aboutir à un mélange ciment-latérite en couche de forme ayant un module de déformation EV2 supérieur ou égale à 230MPa après mise en œuvre.

✚ Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de notre étude visent à :

Vérifier que le graveleux latéritique répond aux spécifications du cahier de prescription technique (CPT)

Déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du graveleux latéritique amélioré

Identifier la meilleure formulation qui répond aux spécifications du CPT ($EV2 \geq 230$ MPa).

✚ Résultats attendus :

Caractériser le graveleux latéritique

Déterminer les caractéristiques du graveleux latéritique amélioré au ciment

Identifier la meilleure formulation répondant à toutes les spécifications.

7. Méthodologie de conception

a. Matériels

Pour mener à bien notre étude, nous avons utilisés différents logiciels à savoir :

- Google Earth : qui nous permettra d'avoir une vue d'ensemble de la zone d'étude
- Autocad : qui nous permettra de modéliser les différentes couches d'une chaussée
- Le pack Office : qui nous facilitera les calculs et la rédaction de notre document.

b. Méthodes

Dans le but d'atteindre les objectifs définis ci-dessus, la démarche adoptée se présentera comme suit :

- Une recherche documentaire

Cette partie a été consacré à la recherche de documents et de textes étudiant les principales thématiques étudiées dans ce mémoire. Elle s'est soldée par l'acquisition de documents étudiant la géotechnique routière, les différentes méthodes et méthodologies de la mise en œuvre d'une couche de forme avec de la grave latéritique améliorée au liant hydraulique.

- Une collecte de données

A ce niveau des recherches ont été menées afin de collecter les différentes données directement liées au projet. Cette recherche a permis l'obtention des données telles que :

- L'étude géotechnique d'APD réalisé
- Le cahier de prescription technique du projet
- La procédure d'exécution des travaux de traitement en place au ciment de la chaussée

- Un suivi des essais réalisés sur le matériau et la mise en œuvre de la couche de forme

Cette partie a été consacrée aux prélèvements des matériaux pour les études au laboratoire de l'entreprise, la mise en place de la couche de forme et le suivi de la réalisation des essais in-situ de contrôle de la qualité de la couche.

- Une étude

Cette partie est consacrée à faire :

- Des revues documentaires des travaux antérieurs en rapport avec la technique de l'amélioration jusqu'à la mise en œuvre
- Une étude du matériau naturel en réalisant les essais d'identifications (analyse granulométrique, limite d'Atterberg), les essais mécaniques (indice de portance CBR, l'essai Proctor), mesure du gonflement
- Une étude du matériau amélioré au ciment (1%, 1,5%, 2%) par les essais de portance (Proctor, CBR), essai de gonflement, essai de compression simple, traction par fendage.
- Une interprétation des résultats obtenus des différents essais

- Une description des dispositions adoptées pour l'exécution de la couche de forme en grave latéritique amélioré
- Une réalisation in-situ des essais de portance pour la détermination du module EV2

CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. GENERALITE DES CHAUSSEES AERONAUTIQUES

Les chaussées aéronautiques sont conçues et construites pour supporter le trafic d'avions pour lequel elles sont destinées et pour fournir une surface stable, unie, rugueuse, et exempte de poussière et d'autres matériaux qui pourraient être soufflés ou aspirés par les réacteurs ou par les groupes moto-propulseurs et ce tout au long de l'année et pendant toute la durée de vie.

A titre indicatif pour un aéroport international, les chaussées aéronautiques couvrent une surface de l'ordre 420.000m². Chaque type d'aire doit être conçu et dimensionné en fonction de sa destination et de sa spécificité (zone de décollage, d'atterrissage, de roulage, d'attente ou de stationnement) pour tenir compte de différentes sollicitations. Les charges de calcul sont frappées par des coefficients propres à chaque zone dits coefficients de pondération des charges.

La chaussée peut être définie comme un ouvrage d'ingénierie (génie civil) composée d'une ou de plusieurs couches disposée(s) sur un espace linéaire aménagé pour faciliter la circulation sécuritaire des véhicules et des personnes. Selon Guy (2008), la route est constituée d'une chaussée qui a pour rôle de :

- ❖ Distribuer la charge et transmettre au sol support une contrainte qui n'entraînera pas de déformation excessive ;
- ❖ Atténuer les mouvements différentiels qui proviennent du sol et limiter les déformations résultantes en surface ;
- ❖ Maintenir ses qualités structurales (portance) et fonctionnelles (adhérence et uni à long terme).

La principale agression de la chaussée est celle du trafic. D'après Berthier (2004), l'action répétée d'une charge roulante sur la chaussée fait apparaître quatre types de dommages :

- ❖ Une usure superficielle de la couche de roulement due aux efforts tangentiels
- ❖ La formation d'ornières par fluage des couches liées, sous l'effet des contraintes verticales et des efforts tangentiels ;
- ❖ Une fatigue des couches traitées, provoquée par leur flexion sous l'action des charges ;
- ❖ Une accumulation des déformations permanentes au niveau du support ou des couches non liées.

Quelques définitions des infrastructures aéronautiques

Sur un aéroport on appelle aire de mouvement l'ensemble des parties aménagées en vue des opérations d'atterrissage et de décollage des avions, de leur évolution au sol, l'aire de

mouvement comprend également la (ou les) aires de trafic. Quant à l'aire de manœuvre, elle comprend les parties d'un aéroport, servant aux décollages, aux atterrissages et à la circulation en surface des aéronefs à l'exclusion des aires de trafic.

L'aire de trafic, d'un aéroport, est destinée aux aéronefs pendant l'embarquement et le débarquement des passagers. Le chargement et le déchargement de la poste ou du fret l'avitaillement en carburant, le stationnement ou l'entretien.

1. Les différentes couches d'une chaussée

Une chaussée comporte en général de bas en haut :

Sol support ou Partie Supérieure des Terrassements (PST) : il s'agit du dernier mètre des terrains en place (cas des déblais) ou de matériaux rapportés (cas des remblais). Elle sert de support à la couche de forme ou, en son absence, aux couches de chaussée.

Couche de forme : Couche mise en œuvre au-dessus de l'arase de terrassement ou sol support permettant d'homogénéiser et/ou à améliorer les caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place, prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée.

Couche d'assise : constituée, en général, de la couche de fondation et de la couche de base, est l'élément structurel principal d'une chaussée. Elle peut être mise en œuvre en une couche, appelée couche d'assise ou en plusieurs couches (Base et Fondation). Elle a essentiellement pour rôle d'assurer, par la mise en œuvre de matériaux sélectionnés, la résistance mécanique pour supporter les charges verticales induites par le trafic, et la répartition des efforts sur la couche de forme éventuelle et le sol support.

Couche de surface : constituée d'une couche de roulement (en contact avec les pneumatiques et permet d'assurer l'adhérence) et une éventuelle couche de liaison (située entre la couche de roulement et la couche de base, essentiellement utilisée pour améliorer l'uni ou retarder la remontée des fissures vers la couche de roulement).

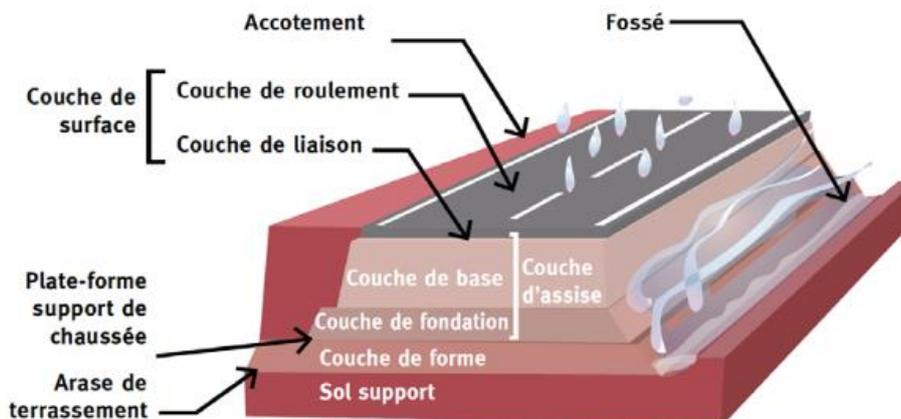


Figure 4: Coupe type d'une structure de chaussée

Source: https://www.routesdefrance.com/wp-content/uploads/RDF_Vademecum_2018_sept18.pdf

date:12/10/2022

2. Les différents types de structures de chaussées aéronautiques

a. Chaussée souple

La détermination de la structure d'une chaussée souple comprend trois phases :

- L'évaluation de la portance du sol de fondation, se fait par la mesure du CBR sur des échantillons de sols compactés à 95% de l'Optimum Proctor Modifié et à 4 jours d'imbibition
- La détermination de l'épaisseur équivalente totale de la chaussée à partir des abaques appropriés pour chaque type d'avion. Généralement la structure d'une chaussée comporte trois couches (couche de fondation, couche de base et couche de surface ou roulement).
- Le choix d'une structure de chaussée donnant une épaisseur équivalente égale à l'épaisseur donnée par l'abaque

Les matériaux rentrant dans la composition de la chaussée sont affectés de coefficients appelés coefficients d'équivalence par lesquels il faut multiplier les épaisseurs réelles des couches pour obtenir les épaisseurs équivalentes.

b. Chaussée rigide

La chaussée rigide est généralement constituée à partir du sol support par une couche de fondation surmontée par une dalle de béton. Bien que cette couche de fondation n'intervienne

dans les calculs que d'une manière réduite, elle participe néanmoins dans la correction du module de réaction du sol et joue des rôles multiples :

- Support continu et homogène pour la dalle notamment au droit des joints
- Par son poids elle s'oppose au gonflement éventuel du sol
- Présente une surface compacte et unie pour les engins de bétonnage.

L'épaisseur de la dalle est déterminée par les abaques appropriés pour chaque type d'avion en fonction de la contrainte admissible de traction par flexion du béton et du module de réaction K du sol.

II. GENERALITE SUR LE GRAVELEUX LATÉRIQUE

Le mot « latérite » a fait son apparition dans la littérature scientifique au début du 19^e siècle pour désigner un matériau servant dans la construction dans la région de Malabar (Inde). Ce terme vient du latin « **later** » qui signifie brique (AUTRET, 1983).

La latérite est une roche résiduelle rougeâtre issue d'un processus d'altération de roches meubles silico-alumineuses avec départ de silice et enrichissement relatif en alumine : on utilise la partie graveleuse et brèchique.

Du point de vue de l'ingénieur routier, on parlera de graveleux latéritique. Il s'agit d'un sol meuble de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant 10 à 35% de fines (passants au tamis de 80 μ m) et un squelette de 20 à 60% (refus au tamis de 2mm). On considère ainsi qu'un sol latéritique contenant plus de 35% de passant à 80 μ m n'est pas un graveleux latéritique ; il entre alors dans les catégories des sols fins.

Les graveleux latéritiques du BURKINA FASO présentent généralement les spécificités techniques suivantes :

- ❖ Granulométrie : 0/40
- ❖ Pourcentage de fines passant au tamis de 80 μ m : 30% ;
- ❖ Refus au tamis de 2mm : 50 à 80%
- ❖ Indice de portance CBR : 18 à 85.

Ces spécificités sont issues de la classification internationale HRB, A24(0) à A26(0) (Pierre LOMPO, 1980)

Les latérites sont utilisées dans le corps des chaussées des routes en terre et des routes revêtues. Dans le cas des routes en terre, elles sont utilisées en couche de roulement, et dans les cas des routes revêtues, elles interviennent en couche de fondation, en couche de base et en couche de forme. Dans l'un ou l'autre des cas, les latérites doivent répondre à des spécifications selon la couche concernée.

Pour le cas particulier de la couche de forme des chaussées qui fait l'objet de la présente, la latérite non améliorée doit satisfaire aux spécifications suivantes [1] :

- ❖ D (diamètre maximal) doit être inférieur à 50 mm ;
- ❖ Teneur en fines (passant au tamis 80 μ m) inférieure à 20% ;
- ❖ L'indice de plasticité (Ip) doit être supérieur à 20 ;
- ❖ Densité sèche maximale doit être supérieure à 2.05t/m³ ;
- ❖ L'indice portant CBR à 95% de la densité sèche maximale du Proctor Modifié et après 4 jours d'imbibition doit être supérieur ou égal à 40 ;
- ❖ Gonflement linéaire doit être inférieur à 2% ;



Figure 5: Gravelleux latéritique de l'emprunt

III. LES TECHNIQUES DE STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE

Introduction

Le traitement des sols a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir, sans préparation, à supporter une route.

Les objectifs recherchés par une stabilisation sont les suivants :

- Amélioration de l'aptitude au compactage
- Diminution de la sensibilité à l'eau
- Augmentation de la résistance mécanique et de la portance (augmentation du frottement interne et de la cohésion).

Il existe plusieurs techniques de stabilisation des sols qui sont regroupés en deux grandes catégories : stabilisation chimique et stabilisation mécanique [2]

1. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique permet, grâce à la réaction du produit avec les composantes du matériau, une augmentation de la cohésion du matériau. Elle consiste à incorporer au sol les liants hydrauliques routiers ou liants hydrocarbonés.

▪ **Traitement aux liants hydrauliques**

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de sels minéraux anhydre réactifs en présence d'eau. Ils s'hydratent en présence d'eau pour former un matériau solide, véritable roche artificielle.

▪ **Traitement au ciment**

Le ciment est utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel.

Historique

Le traitement au ciment est une amélioration du graveleux latéritique en incorporant celui-ci au ciment afin d'obtenir des caractéristiques proches de celles d'un graveleux naturel de bonne qualité. La réaction d'hydratation du ciment présente l'avantage d'une évolution rapide, ce qui permet d'obtenir les résistances nécessaires dans un délai court.

Les premières expériences ont été menées dans les années 50 aux Etats Unis (USA) et en France. Depuis 1985, cette technique n'a cessé de gagner en intérêt et aujourd'hui elle démontre toute son efficacité. En dehors des pays mentionnés, cette technique est utilisée partout ailleurs dans le monde et particulièrement en Afrique subsaharienne pour palier à la rareté des matériaux de bonne qualité pour les couches de fondation et de base pour des nombreux chantiers routiers. [3]

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. La qualité de la réaction dépend de la nature du matériau, du type et de la quantité de liant, de la compacité à la mise en œuvre, de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Les ciments sont normalisés dans leur constitution et leur utilisation (norme NF P 15-301). Le ciment est constitué en majeure partie de clinker (produit de la cuisson du mélange nommé cru : 80% clinker + 20% argile).

Le produit final entre en réaction quasi instantanément avec l'eau et forme un gel qui, en s'hydratant progressivement, se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol.

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition. [4]

- CEM I : Ciment Portland (CPA) contient au moins 97% de clinker plus fillers ;
- CEM II : Ciment Portland Composé (CPJ) contient au moins 65% de clinker et un ou plusieurs autres composants ;
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau (CHF) contient de 40 à 75% de laitier, au plus 25% de clinker et au plus 3% de fillers ;
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ) contient au moins 80% de laitier, au plus 20% de clinkers et au plus 3% de fillers ;
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) contient 20 à 60% de clinker, 20 à 45% de laitier, 20 à 45% de cendres et au plus 3% de fillers.

Trois classes sont définies en fonction de la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours à savoir : 32,5-42,5-52,5.

▪ **Traitement à la chaux**

Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fin argileux ou limoneux en diminuant la teneur en eau et en modifiant immédiatement les propriétés géotechniques du sol. (Puiatti, 2013)

▪ **Traitement aux pouzzolanes**

Les pouzzolanes peuvent être à l'état naturel ou artificiel. Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux résultant des émissions explosives de laves lors des phénomènes volcaniques alors que les pouzzolanes artificielles ne sont que des résidus de combustion de charbon produits dans les industries et/ou centrales d'incinération. Elles sont utilisées en technique routière pour améliorer l'état hydrique d'un sol et pour réaliser les assises en graves-pouzzolanes

▪ **Traitement aux cendres volantes**

Les cendres thermiques produisent des quantités importantes de résidus de combustion, dont les cendres volantes récupérés par dépoussiérage des fumées, avant évacuation dans les cheminées. Ils sont utilisés pour réaliser les assises en graves-cendres volantes.

▪ **Traitement aux laitiers (métallurgie)**

Dans un haut fourneau, la production de la fonte s'accompagne de celle d'un liquide surnageant où se retrouve la gangue du minerai combinée aux fondants ajoutés. Ce liquide, sous-produit de l'industrie sidérurgique est le laitier. En technique routière, le laitier est principalement utilisé pour la réalisation d'assises en grave-laitiers. (Mouton, 1998)

▪ **Traitement aux produits hydrocarbonés**

Les liants hydrocarbonés sont des matériaux constitués essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact des particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances aux déformations en traction, compression et cisaillement. Les principaux liants hydrocarbonés sont le bitume et le goudron.

▪ **Traitement aux produits chimiques**

Certains produits chimiques à base de chlorure de calcium, hydroxyde de calcium, silicates, enzymes, polymers sont utilisés en construction routière pour améliorer la capacité portante des sols (Bakar et al, 2014).

▪ **Traitement mixte**

Le traitement mixte consiste à améliorer la quantité d'un sol par combinaison de deux ou plusieurs stabilisants en vue d'atteindre les performances mécaniques souhaitées. Il existe plusieurs combinaisons mais la plus utilisée est celle de la chaux-ciment. (Génie Hippique, 2004)

2. **Stabilisation mécanique**

La stabilisation mécanique consiste en l'amélioration du squelette granulaire d'un sol par l'ajout d'un matériau afin d'augmenter les possibilités de compactage et la résistance d'un sol.

▪ **Ajout d'un sol fin à un sol grenu**

C'est une méthode utilisée en technique routière pour stabiliser les granulats concassés non plastique.

▪ **Ajout d'un sol grenu (ou une fraction granulaire) à un sol fin**

Ajout de sable et/ou cailloux à un sol fin sert à donner à ce dernier, ce qui augmente les performances mécaniques. La technique est utilisée surtout pour les plateformes argileuses.

▪ **Eliminations des fines et/ou éléments grossiers d'un sol**

L'élimination des fines et/ou des éléments grossiers d'un sol est une méthode utilisée pour améliorer la granulométrie et la portance d'un sol. L'opération est coûteuse ce qui limite son emploi.

▪ **Litho stabilisation**

Elle est une forme de stabilisation mécanique d'une latérite de qualité médiocre par adjonction de concassés (pourcentage souvent supérieure à 10%). Son objectif principal est d'obtenir du mélange un matériau présentant de meilleures performances géotechniques (essentiellement la

portance). Les concassés souvent utilisés sont les concassés le granite, de basalte, de grès et de silexite.

▪ Utilisations des géosynthétiques

Les géosynthétiques améliorent de manière significative le comportement mécanique des sols meubles et mou, ils augmentent la capacité portante du sol mou en répartissant les charges dues au trafic sur une surface plus large. Les géosynthétiques utilisés dans les couches de chaussée sont essentiellement des géotextiles, géogrilles et géocomposite en polymère.

Conclusion

Il existe plusieurs techniques de stabilisations en géotechnique routière. Compte tenu de la disponibilité des stabilisants. Ce présent travail se limite à l'amélioration du sol au ciment.

IV. MATERIELS ET METHODES

L'objet de notre étude sera la technique de traitement au ciment. Nous allons donc améliorer un grave latéritique au ciment pour la mise en œuvre de la couche de forme d'une chaussée aéronautiques. Trois améliorations (1%, 1,5%, 2%) seront traitées en faisant varier chaque fois les quantités de ciment et d'eau afin d'observer l'influence de la granulométrie, de l'argilosité et de la quantité d'eau présente dans le mélange sur la résistance, la rigidité, et la déformation à la rupture du matériau.

Le liant hydraulique utilisé est de type Portland Artificiels illustré par la Figure 6 (contient au moins 65% de clinker et un ou plusieurs autres composants) CEMII 32.5R soit du CPJ45 conformes aux spécifications courantes ; provient de l'usine de CIMBURKINA.

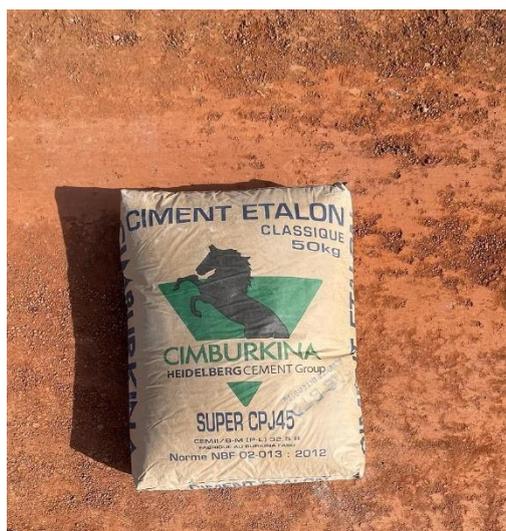


Figure 6: Ciment utilisé sur le chantier

1. Echantillonnage (NF P 18-553 et NF EN 932-1)

L'échantillon utilisé au laboratoire doit être représentatif de l'ensemble, car il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenues au cours des essais de laboratoire.

En général le prélèvement d'échantillons peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. Ces deux procédés peuvent être utilisés conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et la grosseur maximale des grains.

L'échantillon est divisé en quatre (4) parties dont nous ne retenons que la moitié en réunissant deux quarts (2/4) opposés. Cette section est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué. L'opération peut se répéter trois (3) ou quatre (4) fois jusqu'à obtenir la quantité souhaitée. La Figure 7 illustre l'exécution du quartage.

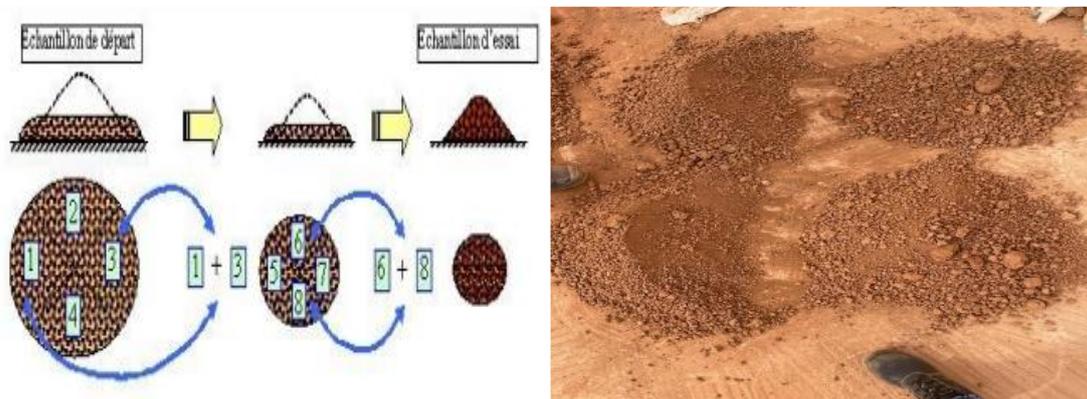


Figure 7: Echantillonnage du matériau provenant de l'emprunt

2. Essais géotechniques réalisés

Les essais de laboratoire qui ont pour but de déterminer les paramètres de nature d'un sol (la granularité et l'argilosité) sont :

- Analyse granulométrique
- Limites d'Atterberg
- Essai Proctor
- Essai CBR
- Essai de compression simple
- Essai de traction par fendage

a. L'analyse granulométrique (Tamisage) NF P 98 232-1

✚ Principe et méthode[5]

C'est le premier essai effectué après l'identification visuelle. Il est le procédé par lequel on détermine la proportion de différents constituants solides d'un matériau grenu en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis emboîtés les uns aux autres, dont les dimensions des ouvertures

sont décroissantes du haut vers le bas. Les pourcentages des refus et/ou passants ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique qui donne un certain nombre d'indicateurs permettant de caractériser la distribution granulométrique du matériau. La préparation de l'échantillon et le tamisage fait selon le mode opératoire NP P 18-560. Les matériels pour la réalisation de l'essai d'analyse granulométrique sont présentés sur la Figure 8.



Figure 8: Matériel pour l'essai d'analyse granulométrique

✚ Expression de résultats

L'analyse granulométrique a été effectuée à partir d'un échantillon de 3203g

Les résultats de l'analyse granulométrique sont reportés un diagramme semi-logarithmique appelé courbe granulométrique. Nous déterminons alors les caractéristiques de graduation du sol à partir de deux (02) facteurs :

- Coefficient d'uniformité de HAZEN C_u

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- Coefficient de courbure

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

D_{10} , D_{30} , D_{60} représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, et 60% de tamisât cumulés.

$C_u < 2$, la granulométrie est dite uniforme (ou serrée).

$C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée (ou variée).

$1 < C_c < 3$ le matériau est dit bien gradué

b. Etats de consistance -Limites d'Atterberg NF P 94-051

✚ Principe et méthode[6]

Il est important de connaître la quantité relative d'eau présente dans un dépôt naturel de sol, mais nous avons également besoin de relier cette teneur en eau à des comportements standards. C'est ce que permettent les limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau correspondant à une certaine limite ou état critique de notre sol. Elles sont utilisées dans la classification des sols, et sont très utiles parce qu'elles corrélient les propriétés et les comportements géotechniques.

Casagrande a défini la limite de liquidité comme la teneur en eau (%) qui correspond à une fermeture de la rainure (sur 10mm) en 25chocs dans la coupelle de l'appareil dit de Casagrande. Si nous portons sur graphique semi-logarithmique la teneur en eau versus le nombre de chocs, nous obtenons une ligne droite. L'intersection de cette courbe le nombre de chocs de 25 donne la limite de liquidité. L'essai se fait sur la fraction 0/0,4mm d'un échantillon représentatif de sol totalement remanié. La préparation de l'échantillon et l'exécution de l'essai se fait selon le mode opératoire NF P 94-051.

La limite de plasticité est définie comme la teneur en eau d'un matériau enroulé en petit boudin qui se brise en petits morceaux de 15 à 20 cm de long au moment où son diamètre atteint 3mm. L'essai se fait sur la fraction 0/0,4mm d'un échantillon représentatif de sol totalement remanié. La préparation de l'échantillon et l'exécution de l'essai se fait selon le mode opératoire NF P 94-051.

Les matériels pour la réalisation de l'essai de Limites d'Atterberg sont présentés dans la Figure 9.



Figure 9: Matériel pour l'essai de limites d'Atterberg

✚ Expressions des résultats

Les limites d'Atterberg ont été effectuées à partir d'un échantillon de 300g

Atterberg a aussi défini ce qu'on appelle l'Indice de plasticité I_p , qui décrit la gamme de teneur en eau dans laquelle le sol est plastique : $I_p = W_L - W_P$

c. Essai Proctor modifié NF P 94 093

✚ Principe et méthode [7]

L'essai s'effectue sur les matériaux passant au tamis de 20mm et consiste à porter à différentes teneurs en eau un échantillon de sol, afin d'en déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimum à travers une courbe appelée courbe Proctor.

Après le quartage, la partie destinée à l'essai a été répartie en cinq (05) parts (illustré dans la Figure 10). Puis chacune des parts de l'échantillon a été pesée avant d'être utilisée pour l'essai.

- L'échantillon est transversé dans un récipient de malaxage où il est mouillé en fonction du pourcentage d'eau correspondant
- On le soumet à un malaxage tout en évitant les pertes d'eau et/ou de matériaux
- Il est ensuite introduit dans le moule et compacté (56 coups de la dame Proctor) par couches successives d'épaisseurs sensiblement égales
- Le moule contenant le matériau compacté est pesé
- Une part est également prélevée dans deux (02) tares, pesée et placée à l'étuve.

✚ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont sur des fiches Proctor illustrées dans l'annexe 2 et 3.



Figure 10: Matériau pesé et mis dans des tares pour l'essai Proctor

d. Essai CBR à 4 jours d'immersion NF P 94 078

🚧 Principe [8]

L'essai CBR est un essai de portance qui pour but de voir le matériau se comporte au passage des charges, et permet de déterminer l'épaisseur des couches de chaussées.

La valeur CBR obtenue, permet, grâce à un réseau de courbes expérimentales et des abaques, de calculer les épaisseurs, nécessaire à la constitution d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieux prévues dans les conditions hydriques futures que subira cette route.

Les éléments du matériau utilisé doivent également être d'au plus 20mm de diamètre. L'échantillon est mouillé avec une quantité d'eau correspondante à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié et soigneusement malaxé dans une bâche étanche pour homogénéisation.

L'échantillon ainsi prêt, sera compacté dans trois (03) moules CBR.

- L'échantillon est compacté en cinq (05) couches successives sensiblement égales. Le matériau du premier moule est porté à une énergie de compactage de dix (10) coups, le second vingt-cinq (25) coups et le troisième de cinquante-six (56) coups, correspondant respectivement à 90%, 95% et 98% de la densité sèche maximale du Proctor.
- Ensuite, les éprouvettes sont conservées pendant quatre jours dans un bac plein d'eau illustrées par la Figure 11, munies d'un comparateur pour la mesure de gonflement s'il s'agit d'un graveleux latéritique cru. Pour le graveleux latéritique amélioré les

épreuves sont conservées pendant sept (07) jours, soit 03 jours à l'air libre et 04 jours dans le bac plein d'eau.

Le délai écoulé, on note le gonflement au comparateur, puis on porte les éprouvettes sous la presse de poinçonnement.

✚ Poinçonnement

Une opération qui s'effectue le quatrième jour de l'immersion. Elle consiste à faire pénétrer dans le matériau, et à une vitesse constante (1,27mm/mn), un poinçon cylindrique et dont les forces correspondantes sont notées.

On commence la lecture lorsque le poinçon est effectivement en contact avec l'échantillon.

Toutes les valeurs d'enfoncement sont notées mais les plus importantes sont celles correspondantes aux enfoncements de 2,5mm et de 5mm.



Figure 11: Moules CBR plongés dans un bac plein d'eau et appareil pour le poinçonnement

e. Essai de compression simple NF EN 13286-41

L'établissement des courbes contraintes déformations et la détermination du module d'élasticité se font à partir de cet essai.

✚ Confection des éprouvettes (NF EN 13286-50)

Les éprouvettes ont été confectionnées dans des moules CBR fendu de dimension 152x152mm (illustrées par la Figure 12). La confection s'est faite par compactage de la quantité prédéfinie du mélange (matériau cru + 2% ciment) dans le moule cylindrique de volume connu en exerçant une pression axiale à l'aide de dame Proctor modifié.

Nous avons utilisé le mode opératoire de confection des éprouvettes CBR pour la confection des éprouvettes des essais de compression simple et de traction par fendage.

Après le compactage, les éprouvettes sont démoulées et emballées dans des sachets plastiques pour éviter la perte d'humidité. Leur conservation s'est faite dans un local avec une température ambiante jusqu'à soumission des essais à 7 jours et à 28 jours.



Figure 12: : Eprouvettes confectionnées et conservées dans du sachet plastique

✚ Réalisation de l'essai de compression simple

Il s'agit de la compression d'un cylindre entre deux plateaux ; la carotte de matériau traité est soumise à une sollicitation en compression par l'intermédiaire d'une presse hydraulique jusqu'à rupture.

La contrainte appliquée et la déformation observée servent à déterminer la résistance et le module élastique. La résistance en compression, notée R_c est égale à la contrainte atteinte au moment de la rupture, et s'effectue à plusieurs âges du matériau (7,28, 32, 60, 90 jours). [9]

→ Mode opératoire :

Dimensions :

Les dimensions de l'éprouvette doivent être mesurées avec une exactitude de 0.5% ; soit un diamètre de 15,2cm et une hauteur de 15,2cm pour nos éprouvettes.

Masse volumique apparente :

L'éprouvette doit être pesée avec une exactitude de $\pm 0.25\%$ et la masse doit être comparée à la masse au moment de la confection de l'éprouvette. La variation doit être notée. Si la variation est supérieure à 2%, la valeur de la résistance à la compression résultante peut être rejetée, car elle risque de ne pas être représentative du matériau soumis à l'essai.

Eprouvettes défectueuses :

Les éprouvettes endommagées ne doivent pas être soumises à essai.

Mise en place de l'éprouvette :

L'excès d'humidité doit être éliminé en essuyant la surface de l'éprouvette avant de la placer dans la machine à essai.

Toutes les surfaces portantes de la machine d'essai doivent être essuyées et les particules ou les corps étrangers doivent être enlevés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec les plateaux de la machine ou les plateaux auxiliaires le cas échéant.

Aucune bande de contact ne doit être utilisée entre les éprouvettes et les plateaux de la machine ou les plateaux auxiliaires.

L'éprouvette doit être centrée sur le plateau inférieur ou sur le plateau auxiliaire avec une exactitude égale à 1% de l'arrête théorique du cube ou du diamètre théorique du cylindre.

Au moment du contact entre l'éprouvette et du plateau supérieur, la rotule sphérique doit être ajustée pour obtenir un contact uniforme entre l'éprouvette et le plateau supérieur.

Application de la charge :

La charge doit être appliquée d'une manière continue et uniforme et sans choc de façon que la rupture se produise entre 30 s et 60 s après le début de l'application de la charge.

Lorsqu'on utilise des machines d'essai à commande manuelle, à l'approche de la rupture de l'éprouvette, toute tendance de la vitesse de mise en charge sélectionnée à décroître doit être corrigée par un réglage approprié des commandes.

Lorsqu'on utilise des machines d'essai à commande automatique, la vitesse de mise en charge doit être vérifiée régulièrement pour s'assurer que la vitesse reste constante. - L'effort maximal, F , indiqué doit être enregistré.

Nous avons utilisé une machine à commande automatique illustrée sur la Figure 13 avec une vitesse constante de 1,27 mm/min.



Figure 13: Exécution de l'essai de compression simple avec la presse hydraulique

Expression des résultats

La résistance à la compression simple notée R_c se détermine selon la formule :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

F la force maximale enregistrée au cours de l'essai (en kN),

S la surface de l'éprouvette calculée à partir du diamètre mesuré avant essai (en m^2)

R_c la contrainte maximale (en kPa), c'est-à-dire la résistance à la compression simple

Des éprouvettes de 7 jours et de 28 jours ont été confectionnées pour les essais de compression simple. Nous avons confectionné au total pour l'essai de la compression simple 12 éprouvettes.

f. Traction par fendage ou traction indirecte (NF EN 13286-42)

La contrainte de traction est obtenue en écrasant une éprouvette cylindrique normalisée entre deux plateaux parallèles. Les efforts sont donc exercés selon deux génératrices diamétralement opposées. La Figure 14 présente l'exécution de l'essai avec la presse hydraulique. La résistance en traction indirecte se note R_t . [10]

→ **Mode opératoire :**

Préparation de l'éprouvette avant l'essai :

Dimension : Les dimensions de l'éprouvette doivent être mesurées avec une exactitude de 0.5%.

Masse : L'éprouvette doit être pesée avec une exactitude de $\pm 0.25\%$. Cette valeur doit être comparée à la masse au moment de la fabrication pour s'assurer que l'évaporation n'a pas

provoqué une perte de masse supérieure à 2 % lors du traitement. Si la perte est supérieure à 2 %, ce fait doit être consigné et la valeur de la résistance à la traction indirecte peut être rejetée étant donné qu'elle peut ne pas être représentative.

Tolérance de parallélisme des génératrices : les deux génératrices opposées sur lesquelles la charge doit être appliquée ne doivent pas présenter un défaut de parallélisme supérieur à 1mm pour 100mm. Les deux génératrices qui ne répondent pas à cette exigence doivent être rejetées.

Placement de l'éprouvette

Les plateaux et la surface des éprouvettes doivent être propres.

L'éprouvette et les bandes de chargement doivent être centrées sur les plateaux ou sur des plateaux auxiliaires avec une exactitude d'au moins 1mm.

Mise en charge

Ajuster la machine d'essai pour obtenir un contact et appliquer la charge de manière continue et uniforme sans variation brusque pour obtenir une montée en contrainte uniforme ne dépassant pas 0,2 MPa par seconde.

Enregistrement des données :

La force maximale au moment de la rupture, F, doit être enregistrée.



Figure 14: Illustration de l'exécution de l'essai de traction indirecte avec la presse hydraulique

Expression des résultats :

La résistance à la traction indirecte de l'éprouvette est calculée automatiquement à partir de la force au moment de la rupture F en utilisant la formule suivante :

$$R_t = 0,8 \times R_{it}$$

$$\text{Avec } R_{it} = \frac{2F}{\pi HD}$$

R_t : résistance à la traction réelle en MPa ;

R_{it} : Résistance à la traction indirecte, en MPa ;

F : force maximale à la rupture, en N ;

H : longueur de l'éprouvette, en mm D : diamètre de l'éprouvette, en mm ;

D : diamètre de l'éprouvette en mm

CHAPITRE 3 : ETUDE AU LABORATOIRE

I. RESULTATS DE ESSAIS REALISES SUR LA GRAVE LATERITIQUE

Ces études permettent de vérifier que les caractéristiques du graveleux latéritique sont conformes aux spécifications du cahier de prescription technique. La grave latéritique doit vérifier les conditions présentées dans le Tableau 1 avant d'être amélioré au ciment. [1]

Tableau 1: Les spécifications du cahier technique pour le matériau cru

Matériau	Nature des essais	Résultats exigés
Graveleux latéritique	Analyse granulométrique	D maxi (mm) < 50
		Teneur en fines < 0,08 mm (%) < 20
	Limites d'ATTERBERG	Indice de plasticité (Ip) < 20
	Proctor modifié	Densité sèche maximale à l'OPM: $\gamma_d \geq 2,05 \text{ t/m}^3$
	CBR à 4 jours d'immersion dans l'eau	CBR (95% OPM) ≥ 40
	Gonflement linéaire	gonfl (%) < 1

1. L'analyse granulométrique (Tamisage) NF P 98 232-1

✚ Résultats (cf. annexe I)

Les résultats obtenus après tamisage permettent de tracer la courbe granulométrique qui représente le pourcentage de passants en fonctions du diamètre des mailles. La Figure 15 représente la courbe granulométrique de la grave argileuse latéritique.

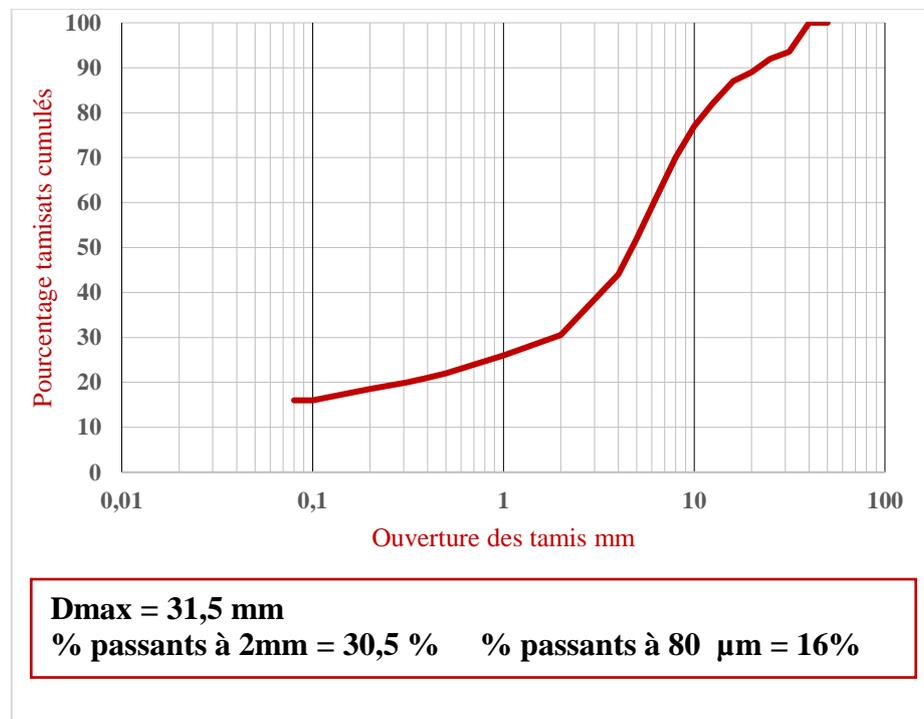


Figure 15: Courbe granulométrique du graveleux latéritique cru

+ Interprétation des résultats

L'examen de cette courbe granulométrique montre que l'échantillon est constitué de 30,5% de squelette en masse et 16% de particules fines en masse.

Les matériaux analysés ont un pourcentage de passant au tamis de 0,08mm supérieur à 10%, ce qui rend difficile la détermination de C_u et C_c . Nous pouvons dire que $D_{10} < 0.080$ donne un coefficient d'uniformité $C_u > 2$, donc la granulométrie est dite étalée.

Les dimensions des plus gros grains respectent le seuil $D_{max} = 31.5 \text{ mm} < 50\text{mm}$ fixé par le guide du CPT cela permet d'éviter le problème ségrégation lors de la mise en œuvre.

Le matériau a un pourcentage de passant au tamis 80 μm égal à 16% inférieur à 20%, conforme au cahier de Prescription Technique (CPT). Il répond donc au critère de convenance de point de vue granulométrique d'un sol naturel pouvant être traité économiquement au ciment.

2. Etats de consistance -Limites d'Atterberg NF P 94-051

+ Résultats (Cf. annexe I)

L'essai a donné les résultats suivants présentés dans la Figure 16.

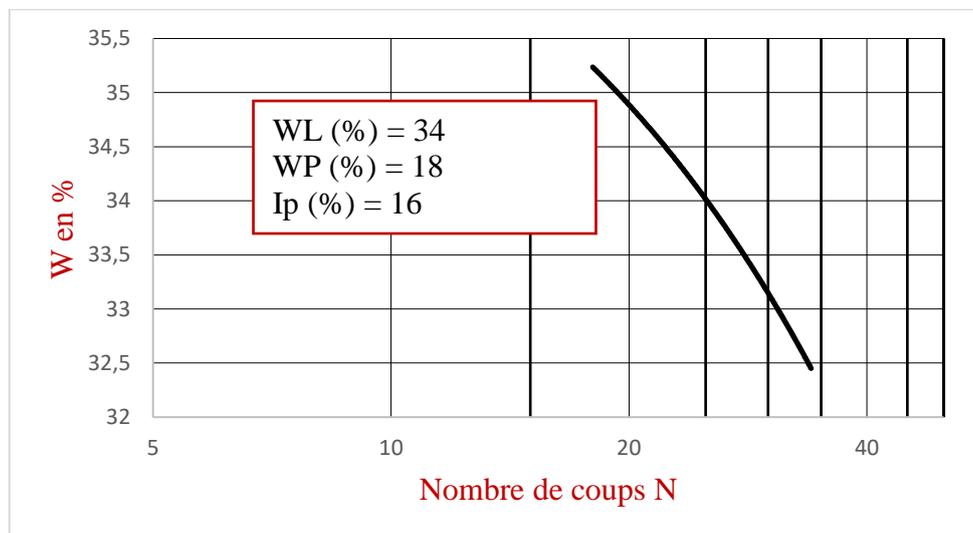


Figure 16: Courbe de limites d'Atterberg

+ Interprétation des résultats

La connaissance de l'argilosité d'un sol est indispensable pour choisir l'agent de traitement adapté au sol considéré.

Le Guide Technique pour la réalisation des Remblais et des couches de forme [11] (GTR, 1992) retient pour I_p les seuils d'argilosité suivants :

$0 < I_p < 12$: **faiblement argileux**

$12 < I_p < 25$: **moyennement argileux**

$25 < I_p < 40$: **argileux**

$I_p > 40$: **très argileux**

Le matériau a un I_p égal à 16%, il est donc un sol moyennement argileux selon le GTR 92. Le matériau est également conforme aux exigences du CPT avec un I_p égal à 16% inférieur à 20%.

3. Essai Proctor NF P 94 093

✚ Résultats (Cf. ANNEXE I)

La Figure 17 traduit la courbe Proctor modifié de la grave argileuse naturelle.

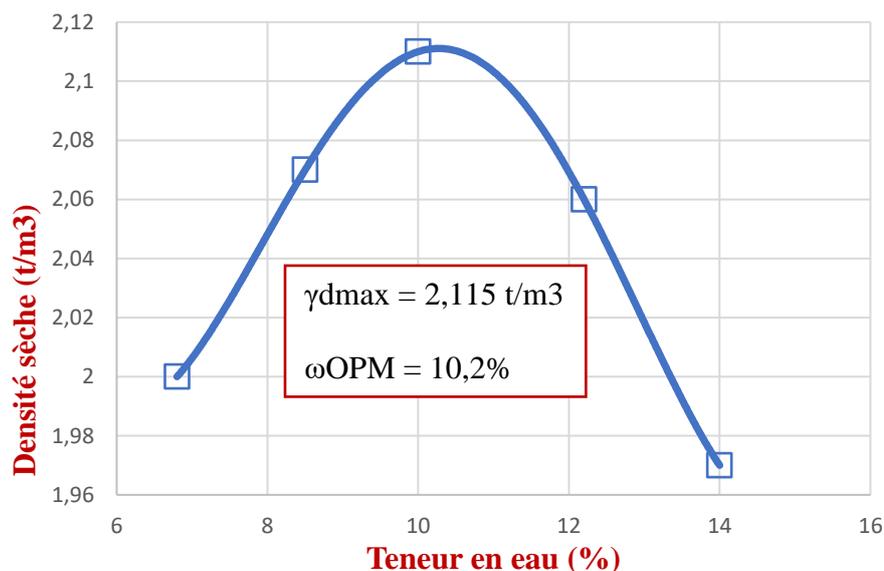


Figure 17: Courbe de l'essai Proctor modifié du matériau cru

✚ Interprétation de résultat

Le CPT du chantier exige que la densité sèche maximale requise soit supérieure à 2,05t/m³ pour une teneur en eau comprise entre 9 à 12%. La limite de la densité sèche égal à 2,115t/m³, est donc respectée et la teneur en eau égal à 10.2% est comprise dans la plage exigée. Ces valeurs permettent de conclure que le matériau convient parfaitement pour un traitement au ciment.

4. Essai CBR à 4 jours d'immersion NF P 94 078

✚ Résultats

Les résultats de l'essai CBR après 4 jours d'immersion sont représentés dans le Tableau 2

Tableau 2: Résultats de l'essai Proctor du graveleux latéritique

ESSAI DE PORTANCE CBR					
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche(t/m ³)	CBR	Teneur en eau (%)		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
<u>56</u>	2,11	<u>80</u>	10,3	11,2	
<u>25</u>	1,995	<u>50</u>		13,1	0,02%
10	1,895	16		14,8	0,03%

A partir de ces données, la courbe CBR présentée dans la Figure 18 a été tracée. Elle illustre l'évolution de la portance CBR de la grave argileuse latéritique (G.AL) en fonction des densités sèches :

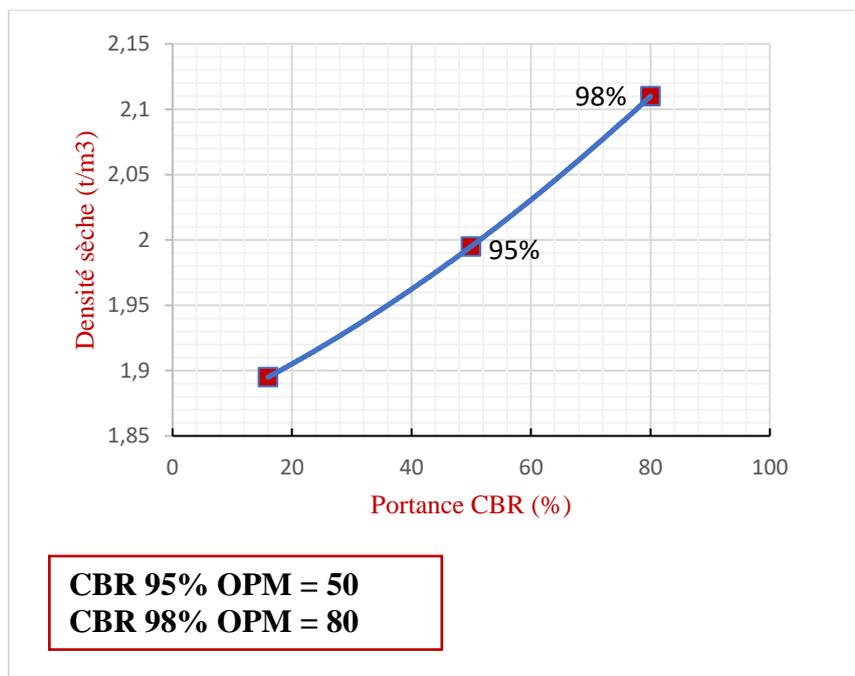


Figure 18: Courbe CBR du graveleux latéritique cru

✚ Interprétation

Au regard du Tableau 1 des spécifications exigées du CTP, nous remarquons que la portance CBR à 95% OPM du matériau égale à 50 est supérieure à 40 à 95% de l'OPM.

Le gonflement linéaire égal à 0.2% à 95% OPM est inférieur à l'exigence du CPT.

Le matériau remplit donc les critères d'aptitude pour un traitement au ciment selon le cahier de prescription technique.

Le Tableau 3 nous renseigne sur les différents résultats obtenus sur le graveleux latéritique.

Tableau 3: Synthèse des résultats d'essais d'identification du matériau cru

Propriétés physiques			PROPRIETES MECANIQUES			
AG	Limite d'Atterberg		Essai PROCTOR		Essai CBR	
% fines	WP	IP	γ_d (t/m ³)	% w	95%	98%
16%	18%	16%	2,115	10,20	50	80

II. RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LE GRAVELEUX LATERITIQUE AMELIORE AU CIMENT

La stabilisation à différents dosages du ciment du graveleux latéritique a été effectuée. Notre préoccupation est de caractériser le matériau qui constituera la couche de forme. L'essai Proctor modifié et CBR ont été réalisés pour les dosages suivants : 1%, 1,5%, 2%.

Le Cahier de Prescription Technique (CPT) exige un CBR à 95% OPM ≥ 130 MPa du matériau amélioré au ciment.

1. Résultats

a. Essai Proctor modifié

Les différents mélanges sont soumis à l'essai Proctor Modifié et les différentes courbes de ces divers mélanges 1%, 1,5%, 2% sont représentées par les Figure 19, Figure 20, Figure 21 respectivement.

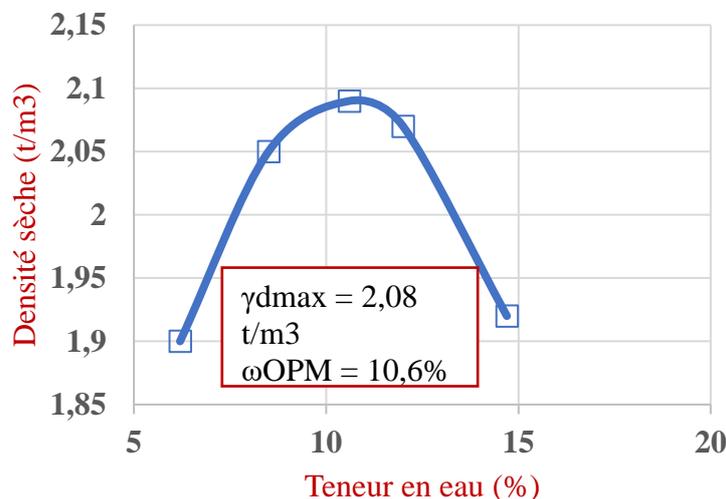


Figure 19: Courbe Proctor modifié du graveleux amélioré à 1% ciment

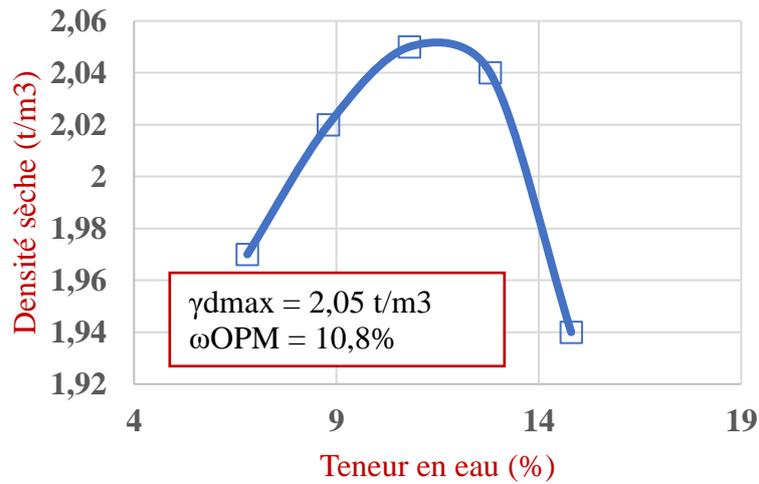


Figure 20: Courbe Proctor modifiée du graveleux amélioré à 1,5% ciment

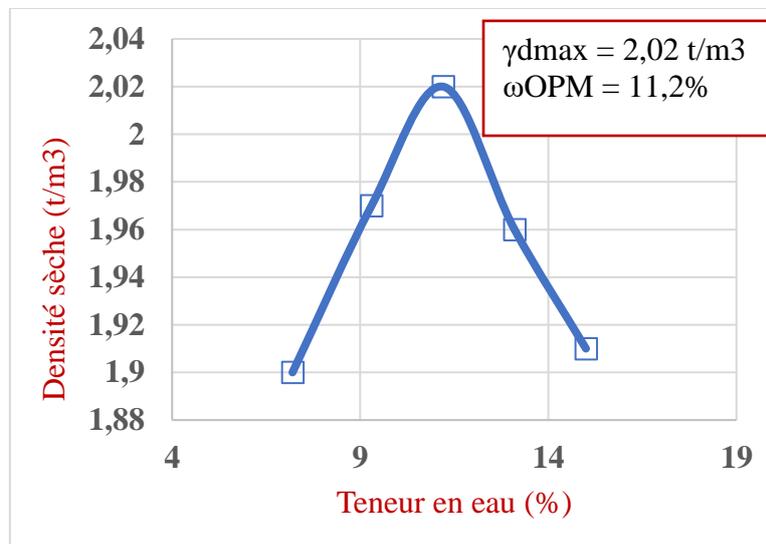


Figure 21: Courbe Proctor modifiée du graveleux amélioré à 2% ciment

b. Essai CBR

Les matériaux qui ont servi à l'essai ont été pesés au préalable tout en respectant le taux d'amélioration du ciment. Après 03 jours à l'air libre et 04 jours d'immersion, nous avons procédé au poinçonnement des moules. Les indices CBR ont été déterminés à 95% et 98% de l'optimum Proctor Modifié (OPM). Les résultats sont consignés dans le Tableau 4.

Tableau 4: Synthèse des résultats de l'essai Proctor modifié du graveleux amélioré au ciment

MATERIAU	CBR A 95%	CBR A 98%	GONFLEMENT (%)
	OPM	OPM	95% OPM
GAL améliorée à 1% de ciment	100	190	0,01%
GAL améliorée à 1,5% de ciment	<u>126</u>	<u>222</u>	0,01%
GAL améliorée à 2% de ciment	<u>165</u>	<u>261</u>	0,00%

2. Interprétations des résultats

a. Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en ciment

L'essai Proctor modifié a été réalisé sur le graveleux latéritique amélioré à 1%, 1,5%, 2% de ciment. Pour chaque mélange, la densité a été déterminée. La Figure 22 donne la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en ciment.

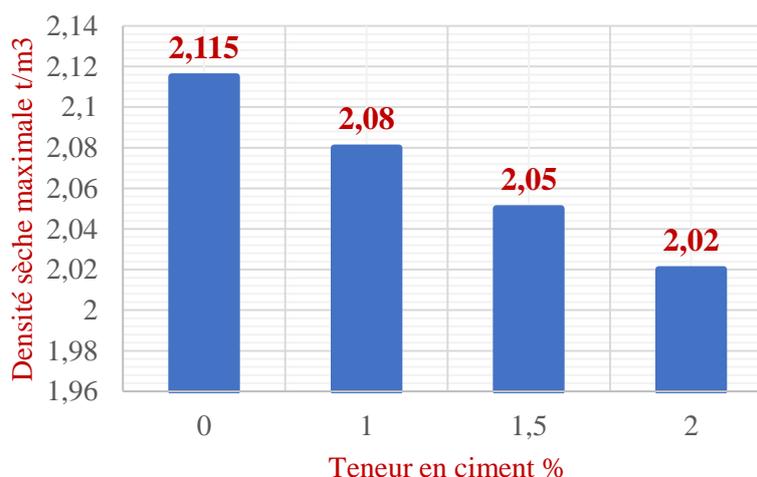


Figure 22: Courbe de variation de la densité sèche en fonction de la teneur en ciment

La densité sèche maximale de la latérite décroît au fur et à mesure que le dosage en ciment augmente. La raison de la diminution de la densité sèche maximale est le faible poids volumique du ciment. La réduction est également due au fait que l'ajout du ciment crée l'agrégation des particules et de ce fait génère un plus grand volume. Cela entraîne une modification de la taille des particules. [12]

a. Variation de la teneur en eau en fonction de la teneur en ciment

L'essai Proctor modifié a été réalisé sur le graveleux latéritique amélioré à 1%, 1,5%, 2% de ciment. Pour chaque mélange, la teneur en eau a été déterminée. La Figure 23 donne la variation de la teneur en eau en fonction de la teneur en ciment.

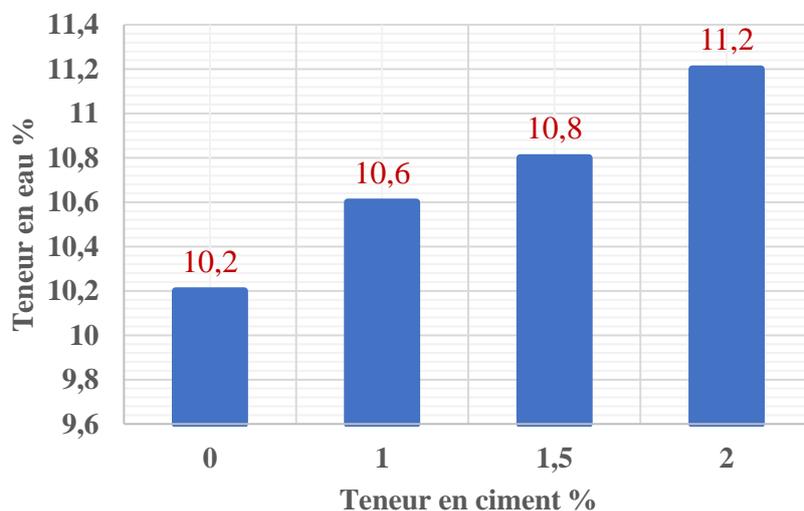


Figure 23: Courbe de variation de la teneur en eau en fonction de la teneur en ciment

Le traitement au ciment augmente la valeur de la teneur en eau optimale. L'augmentation est due à la forte affinité du ciment vis-à-vis de l'eau. L'augmentation de la quantité du ciment requiert plus d'eau pour dissocier la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et pour produire des cations Ca^{+2} nécessaires aux réactions d'échange cationique. [12]

b. Evolution de la portance CBR en fonction de la teneur en ciment

La Figure 24 donne l'évolution de la portance CBR à 95% et à 98% de l'OPM du graveleux latéritique amélioré en fonction de la teneur en eau.



Figure 24 Courbe d'évolution du CBR en fonction de la teneur en ciment

Nous remarquons que la portance CBR croit en fonction du taux d'amélioration. Cette augmentation est due au développement continu de la tobermorite qui est bien connue comme un composé type « ciment ».

Le ciment contribue à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques par un mécanisme de jonction des particules du sol par les silicates de calcium hydratés produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuse du sol.[12]

Nous pouvons donc déduire que le dosage en ciment et la compacité ont une forte influence sur la résistance. Plus le dosage est élevé plus la résistance est grande, il en est de même pour la compacité.

Conclusion

Au terme des études sur l'amélioration du graveleux latéritique au ciment, nous avons constaté que :

- La densité sèche maximale diminue en fonction de la teneur en ciment, de 2,115t/m³ pour le matériau cru elle passe à 2,08t/m³ pour le matériau amélioré à 1% de ciment ;

2,05t/m³ pour le matériau amélioré à 1,5% de ciment et 2,02t/m³ pour le matériau amélioré à 2% de ciment.

- La teneur en eau augmente en fonction de la teneur ciment, de 10,2% pour le matériau cru elle passe à 10,6% pour le matériau amélioré à 1% de ciment ; à 10,8% pour le matériau amélioré à 1,5% de ciment et à 11,2% pour le matériau amélioré à 2% de ciment.
- La portance CBR augmente en fonction de la teneur en ciment et en fonction de la compacité. Elle varie entre 100-165 pour le matériau amélioré à 95% OPM et 190-261 à 98% OPM.

Le cahier de spécification technique exige pour le matériau amélioré un indice CBR à 95% OPM \geq 130. L'amélioration à 2% est alors la formulation optimale pour le projet.

CHAPITRE 4 : LA TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

I. MISE EN ŒUVRE

Introduction

La présente procédure permet de décrire toutes les tâches de mise en œuvre de la stabilisation au ciment avec les contrôles d'exécution et de conformité associés dans le but de satisfaire à la qualité finale visée (module de déformation $EV2 \geq 230 \text{ MPa}$ de la couche de forme après mise en œuvre). L'amélioration au ciment concerne principalement la couche de forme. L'épaisseur de mise en œuvre est 25cm. L'amélioration à 2% de ciment est celle qui donne des résultats conforme au cahier de spécifications technique.[13]

1. Ressources

a. Personnels

Conducteur des travaux

Chef de chantier

Chef d'équipe

Pointeur / mesureur

Magasinier

Conducteurs d'engins

Chauffeurs

Manœuvres

Equipe topographie (01 chef de brigade, 01 opérateur, 02 aides, MDC, contrôle externe)

Equipe laboratoire (Géotechnicien, chef laboratoire, 01 opérateur, 02 aides, MDC, contrôle externe)

Equipe HSE (01 responsable HSE, 02 signaleurs)

b. Matériels

Matériel de topographie (niveau, mires, piquets, GPS, etc...)

Matériel de laboratoire (gammadensitomètre...)

Recycleuse RM 350

02 compacteurs vibrants cat. V5

Compacteur à pneu cat. P2

02 citernes à eau de 18 m³

Plateau pour le ciment

Raclettes d'épandage du ciment

Petit matériel (pelles, cordes, marteaux)

c. Fournitures

Ciment CEM II 32.5

Eau

Latérite (le matériau de base provient de la sélection de matériaux latéritiques de l'emprunt n°4).

2. Méthodologie de mise en œuvre

a. Approvisionnement du matériau et contrôle topographique

Dans cette phase, il s'agit d'approvisionner le matériau de la couche de forme.

Après approvisionnement, le matériau est compacté au rouleau vibrant pour obtenir une compacité d'environ 90% OPM et nivelé à +2 cm par rapport à la cote théorique (les contrôles topographiques à l'issue du sol-ciment permettront de réguler cette surépaisseur avant malaxage afin d'obtenir des cotes almétriques sur la couche de sol-ciment conformes). Un contrôle topographique est réalisé pour s'assurer que le profil en long et en travers de la couche de forme seront conformes au projet d'exécution.

Un échantillon de matériau est prélevé et envoyé au laboratoire pour établir :

- La référence densité sèche du cru pour le calcul des dimensions des mailles ou le débit d'épandeur du ciment
- La référence avec amélioration au ciment suivant les doses prescrites, pour le suivi des compacités

b. Epandage de ciment

L'épandage du ciment représenté dans la Figure 25, a été fait manuellement, à l'aide de raclettes, des sacs de ciment de 50kg chacun selon les mailles suivantes :

$$a \text{ (m)} = 3,902/\gamma_d \text{ avec } \gamma_{d\max} \text{ (GAL crue)} = 2.115\text{t/m}^3$$

Soit a le côté dans le sens longueur de la chaussée. Dans notre cas $a = 1.84\text{m}$

Soit b le côté dans le sens largeur de la chaussée. Dans notre cas $b = 2.5\text{m}$ ce qui équivaut à la largeur de la recycleuse.



Figure 25: Illustration du traçage des mailles pour le dosage en ciment et étalage du ciment

c. Malaxage

Le malaxage se fera à l'aide de la recycleuse RM 350, sur 25cm de profondeur, en suivant le profil en travers après étalage du ciment. Un recouvrement d'au moins 10cm est fait lors de la réalisation d'une bande sur la bande existante.

La recycleuse est équipée d'un système d'asservissement en eau. Elle avance en poussant le camion-citerne. La teneur en eau est ajustée en ajoutant la quantité d'eau nécessaire. Cette teneur en eau devra être maintenue à plus ou moins 2% de l'OPM avant compactage. La Figure 26 illustre le malaxage avec la recycleuse connectée à un camion-citerne.



Figure 26: malaxage du matériau à l'aide de la recycleuse connectée à un camion-citerne

d. Compactage

Une passe correspond à un aller ou un retour du compacteur.

Le pré-compactage du matériau malaxé se fera à l'aide d'un compacteur à pneu (02 passes) et d'un compacteur à rouleau lisse qui sera juste derrière la recycleuse.

Après le nivellement de la plate-forme, le compactage sera mené suivant la séquence suivante :

- Une suite de passes du compacteur à rouleau lisse en grandes vibration jusqu'à obtention des compacités.
- Après la découpe (reprofilage) deux passes de compacteur à pneu (P2), pour éviter l'effet de feuilletage.

A toutes les passes du compacteur à rouleau lisse, à partir de la deuxième passe, il sera effectué un contrôle de compacité au gammadensitomètre, afin de voir l'évolution de la compacité. La Figure 27 montre le compactage et le nivellement du matériau amélioré après le malaxage.



Figure 27: compactage et nivellement de la couche de forme après malaxage

e. Phase de cure

A la fin de l'exécution du sol-ciment et conformément à la procédure d'exécution, la couche de sol-ciment sera maintenue humide pendant au moins une semaine. Ce maintien se fera par arrosage à la citerne dès que la surface de sol-ciment commencera à se sécher.

La couche de sol-ciment ne sera pas circulée avant l'exécution de l'ensemble des résultats.

II. CONTROLE DE LA QUALITE

1. Contrôle de la compacité NF P94-061-1

Un contrôle de la qualité du compactage doit se faire en n'excédant pas le délai de prise du ciment. Il sera effectué à l'aide du gammadensitomètre [14], la Figure 28 illustre l'appareil Troxler utilisé pour l'essai de compacité. Le contrôle a été fait à chaque 20m (sur chaque profil) et 3 points par profil. Il faut rappeler que l'objectif de compacité est de 97% OPM. Le Tableau 5 présente les résultats de l'essai de compacité de la couche de forme. (**Annexe 3**)



Figure 28: l'appareil Troxler utilisé pour l'essai de compacité sur le sol-ciment

Tableau 5: Résultats de l'essai de compacité avec le Troxler

COUCHE DE FORME 2% CIMENT		
COMPACITE (%)	Valeur minimale	95,9
	Valeur maximale	100
	Moyenne	98,93

Au regard de la moyenne générale 98.93%, nous pouvons dire que l'amélioration à 2% de ciment a permis d'atteindre notre objectif. Par contre il y a des profils (PK) où l'objectif n'est pas atteint. Et pour y remédier, nous allons effectuer des reprises en faisant un compactage au compacteur à rouleau pour resserrer la couche à ces niveaux, mais dans le temps de prise du ciment.

2. Contrôle de la portance de la plateforme : module EV2 sous le chargement statique NF P 94-117-1

Le cahier de spécification technique exige un module de déformation **EV2 \geq 230 MPA**. EV2 est le module de déformation du sol à la plaque au second cycle de chargement [15] (**annexe 3**). L'essai a été fait sur chaque 20m c'est-à-dire sur chaque profil kilométrique. La Figure 29

illustre les matériels utilisés pour la détermination de la portance et le Tableau 6 présente les résultats de l'essai de portance.



Figure 29: Réalisation de l'essai de portance sur le sol-ciment

Tableau 6: Résultats de l'essai de portance module EV2

COUCHE DE FORME 2% CIMENT				
Essai de portance à la plaque statique		Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne
	EV1 (MPa)	187	330	229
	EV2 (MPa)	236	450	<u>299</u>
	k (EV2/EV1)	1,07	1,89	<u>1,31</u>

Nous avons eu un module de déformation EV2 07 jours de la mise en œuvre égal à **299 MPa**. Ce qui traduit que le traitement à 2% de ciment est la formulation optimale pour l'atteinte des objectifs du projet. La couche de forme est conforme aux spécifications du projet.

Le compactage est d'autant meilleur que le rapport k est faible ; en général la spécification conventionnelle admet une valeur du rapport $k < 2$.

$k = \frac{EV2}{EV1}$ est le rapport des modules à la plaque de deux chargements successifs pour déterminer si le compactage est suffisant.

3. Contrôle de la portance CBR à 3jrs à l'air libre et 4jrs d'immersion

Le matériau amélioré à 2% in-situ a été prélevé, conservé dans des seaux en plastiques pour éviter la perte d'eau et acheminé au laboratoire pour l'essai CBR. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7: Résultats de l'essai Proctor modifié du graveleux amélioré in-situ

ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR (%)	Teneur en eau		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
56	2,15	211	11,5	12,5	
25	2,05	147		13,4	0,01%
10	1,94	60		14,5	0,02%

Après mise en œuvre le matériau amélioré à 2% de ciment a un CBR à 95% OPM, supérieur au CBR à 95% OPM exige du cahier des spécifications.

4. Contrôle de la résistance à la compression simple NF EN 13286-50

Pour l'essai nous avons confectionné des éprouvettes de 152x152mm. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8: Résultats de l'essai de compression simple du graveleux amélioré au ciment in-situ

RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (R _c)				
Age de maturation	N° Epreuve	Force en KN	R _c en MPa	R _c moyenne en MPa
A 07 jours	N°1	38,1	2,1	2,25
	N°2	46,45	2,56	
	N°3	37,74	2,08	
A 28 jours	N°4	68,59	3,78	3,83
	N°5	75,3	4,15	
	N°6	64,59	3,56	

Le CEBTP exige une résistance à compression simple RC à 07 jours comprise entre 1,8 MPa et 3MPa ($1,8 \text{ MPa} < R_{c \text{ 7 jours}} < 3 \text{ MPa}$) pour une couche de fondation.

Au regard des résultats obtenus à 07 jours d'écrasement, le matériau amélioré in-situ est conforme aux spécifications du CEBTP pour une couche de fondation, donc largement suffisante pour une utilisation en couche de forme.

5. Contrôle de la résistance à la traction indirecte NF EN 13286-42

Les résultats sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9: Résultats de l'essai de traction indirecte du graveleux amélioré au ciment in-situ

RESISTANCE A LA TRACTION (R_t)					
Age de maturation	N° Eprouvette	Force en KN	Rit en MPa	R_t en MPa	R_t moyenne en MPa
A 07 jours	N°1	16,78	0,46	0,368	0,38
	N°2	19,05	0,52	0,416	
	N°3	15,87	0,44	0,352	
A 28 jours	N°4	29,94	0,82	0,656	0,65
	N°5	27,21	0,75	0,6	
	N°6	31,75	0,87	0,696	

Un matériau amélioré au ciment doit avoir une résistance à la traction à 07 jours de cure supérieure à 0,3 MPa selon les spécifications du CEBTP pour une couche de fondation. Nous avons obtenu une résistance moyenne en traction égale à 0,38MPa donc conformes aux spécifications.

Au regard des résultats obtenus et les spécifications du CEBTP, nous pouvons dire que si le matériau amélioré est acceptable pour une utilisation en couche de fondation selon les spécifications alors il est suffisamment acceptable pour le projet, c'est-à-dire son utilisation en couche de forme.

Conclusion

La géotechnique est une phase importante dans la construction routière. Les résultats des essais que nous avons menés ont confirmé la qualité de la couche de forme.

L'amélioration de la latérite au ciment à 2% avec une énergie de compactage à 97% de l'OPM a permis d'atteindre l'objectif du projet.

CONCLUSION

Le graveleux latéritique est un des produits de l'altération des roches dans les zones intertropicales. Compte tenu de son abondance et de ses caractéristiques, ce véritable béton de sol est utilisé en Afrique pour la construction des chaussées.

Le principal objectif de notre étude est de trouver un matériau amélioré au ciment satisfaisant pour une couche de forme d'une chaussée aéronautique conforme aux spécifications du Cahier de Prescription Technique. La couche de forme doit avoir un module de déformation EV2 supérieure ou égale 230 MPa. Pour cela nous avons effectué divers essais sur le graveleux latéritique et sur le graveleux latéritique amélioré au ciment. On peut citer en autres citer les essais d'analyse granulométrique, Limites d'Atterberg, l'essai Proctor, l'essai CBR, la compression simple et de traction par fendage.

Les principaux critères d'utilisation du graveleux latéritique en couche de forme dans notre projet sont fixés par les plages des limites d'Atterberg, les densités de l'OPM, l'analyse granulométrique, les gonflements et surtout les valeurs de l'indice de portance CBR à 95% de l'OPM et 4 jours d'imbibition qui doit être de l'ordre de 40. Les essais au laboratoire et les contrôles in-situ nous ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants à savoir : un CBR à 95% OPM de 50 du matériau cru à **165** du matériau amélioré à 2% de ciment ; le module EV2 moyen égal à **299 MPa** ; la résistance à la compression moyenne à 7 jours **2,25 MPa** et la résistance à la rupture moyenne à 7 jours **0,38 MPa**. Toutes les valeurs obtenues sont conformes aux spécifications du CEBTP.

Le traitement au ciment des sols graveleux latéritiques modifie la nature de leur partie argileuse en la rendant moins gonflant (un dosage de 2% de ciment réduit à zéro le gonflement de nos matériaux à 95% OPM). L'hydratation du ciment crée un feutrage qui immobilise les éléments des matériaux les uns par rapport aux autres et leur confère une cohésion. Le traitement de 2% ciment a permis d'accroître la résistance du graveleux latéritique. Les études au laboratoire ont permis d'apprécier l'accroissement de la résistance du matériau amélioré à 2% ciment. La teneur en eau est un élément important dans la réussite du traitement. Elle doit être déterminée avec délicatesse. Plus la teneur en augmente, plus la résistance diminue.

Les avantages de la technique sol ciment sont l'obtention de matériaux homogènes, durables et stables, dotés d'une grande rigidité et d'une excellente tenue à la fatigue ; bon comportement par temps de chaud sans déformation, niorniéage.

RECOMMANDATIONS

Au regard de la mise en œuvre de cette technique d'amélioration (traitement au ciment), nous formulons les recommandations suivantes à l'endroit de l'entreprise.

- Faire des essais supplémentaires pour l'identification du matériau à savoir l'essai au bleu de méthylène et sur le matériau amélioré l'essai de sensibilité à l'eau, l'essai de compression simple et de l'essai de traction indirecte,
- Se doter de matériels d'essai de bonnes qualités pour les essais in-situ,
- Etalonner les machines d'essai aux dates prévues,

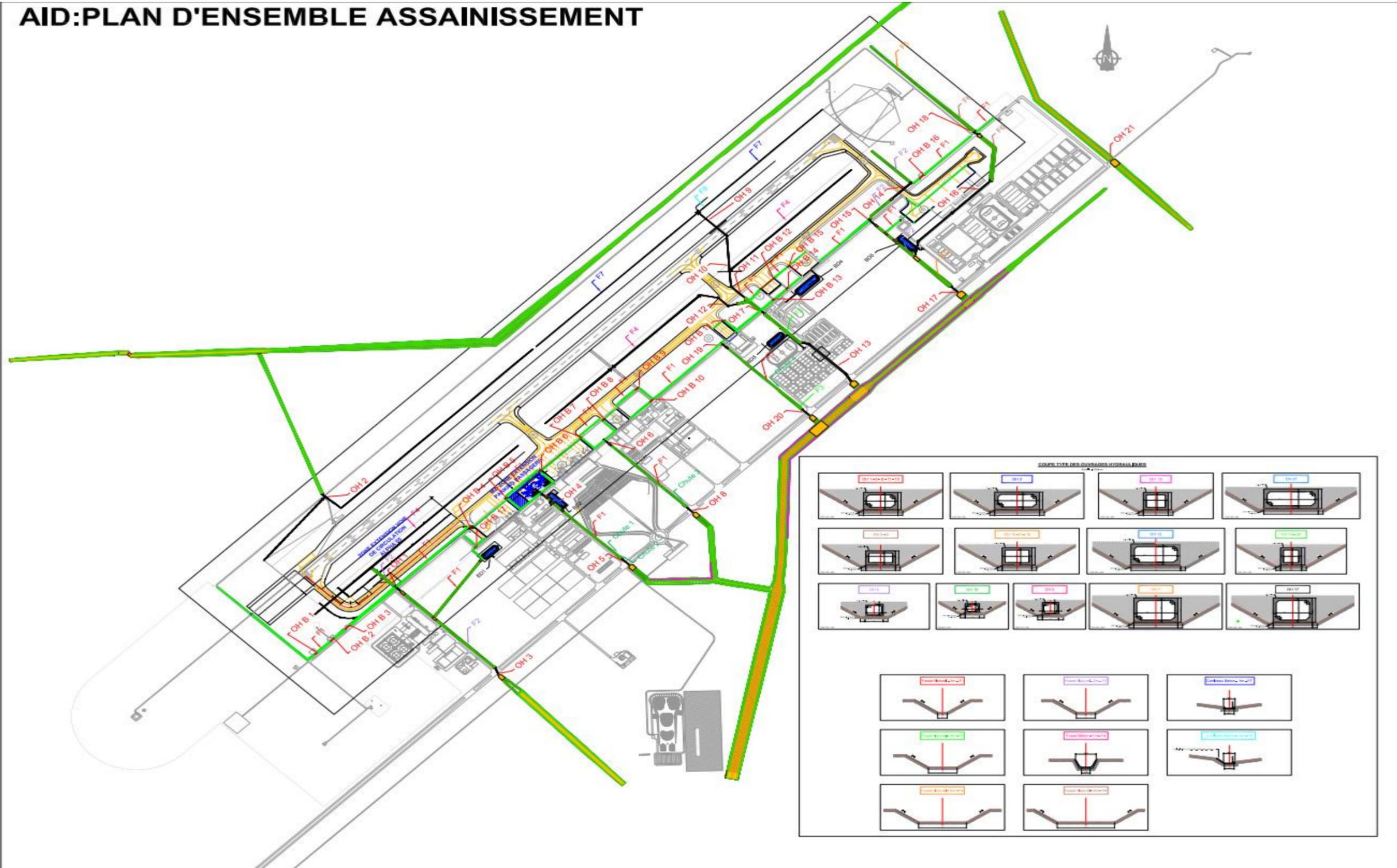
BIBLIOGRAPHIE

- [1] « MOAD Cahier des spécifications techniques- Terrassements et chaussée côtes piste-Clôture OACI ».
- [2] Honoré TUYISHIME, « étude comparative des différentes techniques de stabilisation en géotechnique routière ».
- [3] « GTS, Guide technique "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme", LCPC-SETRA, Janvier 2000 ».
- [4] « Guide technique réalisation des remblais et des couches de forme fascicule1 et 2 ».
- [5] « NF P 98232-1 Analyse granulométrique (Tamisage) ».
- [6] « NF P 94-051 Etats de consistance -Limites d'Atterberg ».
- [7] « NF P 94 093 Essai Proctor ».
- [8] « NF P94-078 Essai Indice CBR après immersion Indice CBR immédiat-Indice Portant Immédiat ».
- [9] « AFNOR (2003) NF EN 132286-41. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques et essai de détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques ».
- [10] « AFNOR (2003) NF EN 132286-42. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques et essai de détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques ».
- [11] « GTR, Guide technique "Réalisation des remblais et des couches de forme ", LCPC-SETRA, Septembre 1992 ».
- [12] « Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritiques du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (Bâtiment et Route) ».
- [13] SOGEA SATOM, « Procédure de la mise en œuvre du sol ciment SOGEA SATOM ».
- [14] « Compacité au gammadensimètre à pointe NF P94-061-1 ».
- [15] « PORTANCE DES PLATES-FORMES : Module EV2 sous la chargement statique NF P 94-117-1 ».

ANNEXES

ANNEXE 1 : PLAN D'AMENAGEMENT L'AEROPORT INTERNATIONAL DE DONSIN BURKINA FASO (SOURCE : SOGEA SATOM).....	XI
ANNEXE 2 : RESULTATS DE ESSAIS REALISES SUR LE GRAVELEUX LATERITIQUE NATUREL	xii
ANNEXE 3 : ESSAI GEOTECHNIQUE SUR LE MATERIAU AMELIORE A PLUSIEURS DOSAGES DE CIMENT	xvi
ANNEXE 4 : L'ESSAI DE COMPACITE ET DE PORTANCE A LA PLAQUE STATIQUE.....	xxii

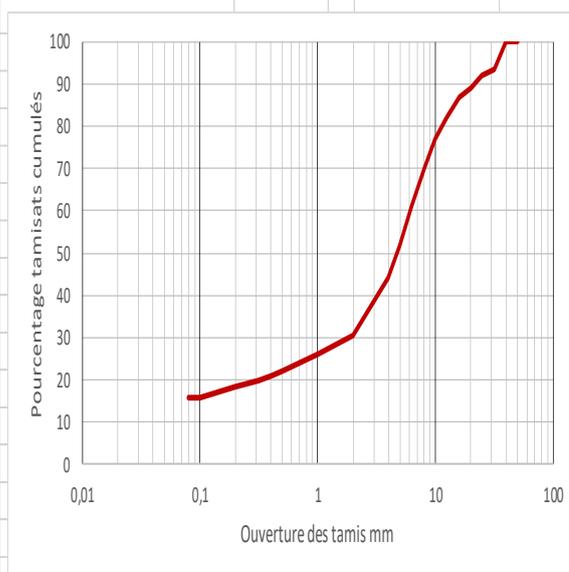
AID:PLAN D'ENSEMBLE ASSAINISSEMENT



ANNEXE 2 : RESULTATS DE ESSAIS REALISES SUR LE GRAVELEUX LATERITIQUE NATUREL

1. Analyse granulométrique GAL naturelle

  <p>P.O. Box 885, 13009 Sulaib, Kuwait Harood Al-Sagor Street Al-Kharafah Tower, 13th Floor P.O. No. 5191, Al-Qadisia Kuwait City Tel: 22282510 22282514 Fax: 22282315</p>		IDENTIFICATION Grave Naturelle Analyse granulométrique selon la norme NF EN ISO 17892-4		BF-R2-F48-V3 Version du 06/09/2019
Pays: Burkina Faso		Chantier : Aéroport Lot 2A: chaussées aéronautiques		
I.ECHANTILLON		II.ESSAI		III.REFERENCE MATERIEL
N° Echantillon: 950		Date d'essai: 01/07/2022	N° serie tamis: T1	
Nature: GAL		Opérateur: KOALA Sylvie	Balance N°: B020	
Provenance: Piste coté droit PK 2+200 au PK 2+400			Etuve N°: ET008	
Lieu prélèvement: Couche de forme		Tare n°: DD4	Classification GTR: CU (D60/D10) CC (D30) ² /CU	
Date de prélèvement: 23/06/2022		Poids total sec (P1): 3203		
Opérateur: Sylvie KOALA		Poids total sec après lavage (P2): 2704		
Module AFNOR	Tamis (mm)	Poids cumulés des refus	%Refus cumulés	% Passants cumulés
48	50	0	0	100
47	40	0	0	100
46	31,5	208	6,5	93,5
45	25	250	8	92
44	20	349	11	89
43	16	426	13	87
42	12,5	588	18	82
41	10	734	23	77
40	8	962	30	70
39	6,3	1250	39	61
38	5	1520	47,5	52
37	4	1795	56	44
34	2	2226	69,5	30,5
31	1	2383	74	26
28	0,5	2496	78	22
27	0,4	2525	79	21
26	0,315	2558	80	20
24	0,2	2614	81,5	18,5
21	0,1	2688	84	16
20	0,08	2701	84	16
Fond	3			



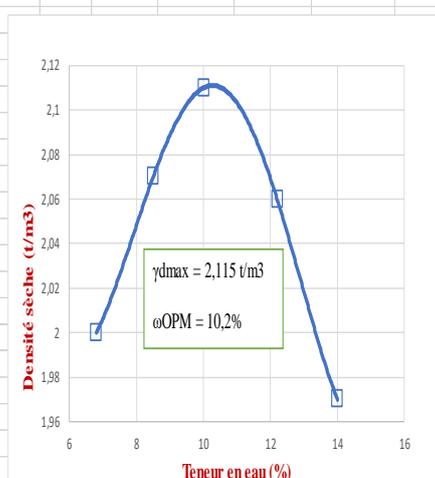
2. Limites d'Atterberg GAL naturelle

N° Echantillon : 950									
Nature matériau: GAL									
Provenance : Piste coté droit PK02+200 au PK02+400									
Date de prélèvement: 23/06/22									
Lieu de prélèvement: Couche de forme									
Date d'essai : 30/06/22									
Opérateur Sylvie KOALA									
Nombres de coups		18		24		29		34	
Tare N°	g	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Masse totale humide	g	10,81	10,81	10,23	10,21	10,41	11,56	11,29	10,9
Masse totale sèche	g	814	814	777	776	796	881	867	839
Masse tare	g	0,58	0,58	0,59	0,59	0,6	0,6	0,66	0,63
Masse eau	g	2,67	2,67	2,46	2,45	2,45	2,75	2,62	2,51
Masse sèche nette	g	7,56	7,56	7,18	7,17	7,36	8,21	8,01	7,76
Teneur en eau	%	35,3	35,3	34,2	34,1	33,2	32,4	32,7	32,3
Teneur en eau moyenne	%	35,3		34,1		33,3		32,5	
		WL= 34,0%							
		4,0175844							

3. Essai Proctor GAL naturelle

  <p style="font-size: 8px;">P.O. Box 881, 13009 Sable, Koweït Hameed Al-Sagoff Street Al-Jahra' Tower, 13th Floor P.O. No. 2791, Al-Qadha Koweït City Tel.: 22220100 22220104 Fax: 22220115</p>	ESSAI PROCTOR MODIFIE Grave Naturelle Sélectionnée Norme NF P 94-093/NF EN 13286-2
Pays: BURKINA FASO	Chantier : Aéroport de Donsin Lot2A. Chaussées aéronautiques

N°Echantillon : 950
 Nature matériau : GAL
 Provenance : Piste coté droit PK02+200 au PK02+400
 Lieu prélèvement : couche de forme
 Date d'essai : 24/06/2022
 Opérateur : Sylvie KOALA

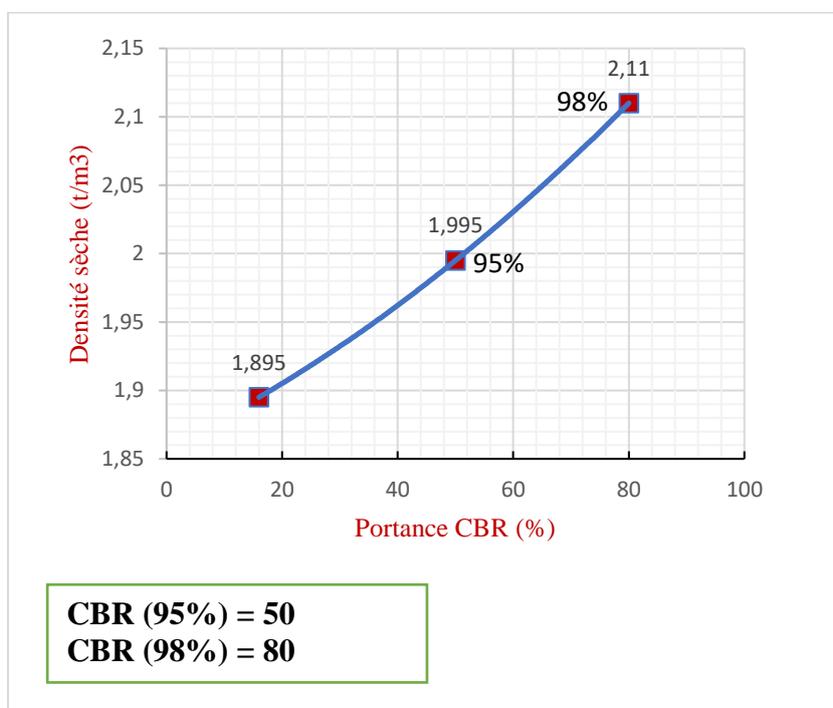


Teneur en eau optimum; %	10,2
DENSITE SECHE MAX,t/m³	2,115

ESSAI N°	1		2		3		4		5	
Masse du moule	3775		3775		3775		3775		3775	
Poids Total Humide (Moule+matériau)	8275									
Volume du moule	2103		2103		2103		2103		2103	
Masse de matériau humide	4500									
N° de tare	SA	V04	CA2	C63	A	F07	F29	Cm70	A10	B15
Poids Tare	78	72	68	79	79	72	72	80	70	68
Masse Totale matériau humide	493	504	594	513	652	505	451	583	487	487
Masse Totale matériau sec	464	479	553	478	600	465	410	528	436	435
Masse du matériau sec	386	407	485	399	521	393	338	448	366	367
Masse d'eau	29	25	41	35	52	40	41	55	51	52
Teneur en eau	7,5	6,1	8,4	8,7	9,9	10,1	12,1	12,3	13,9	
Teneur en eau moyenne	6,8		8,5		10		12,2		14	
DENSITE HUMIDE	2,14		2,245		2,32		2,31		2,25	
DENSITE SECHE	2		2,07		2,11		2,06		1,97	

4. Essai de portance CBR GAL naturelle

ESSAI DE PORTANCE CBR					
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche(t/m ³)	CBR	Teneur en eau (%)		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
56	2,11	80	10,3	11,2	
25	1,995	50		13,1	0,02%
10	1,895	16		14,8	0,03%



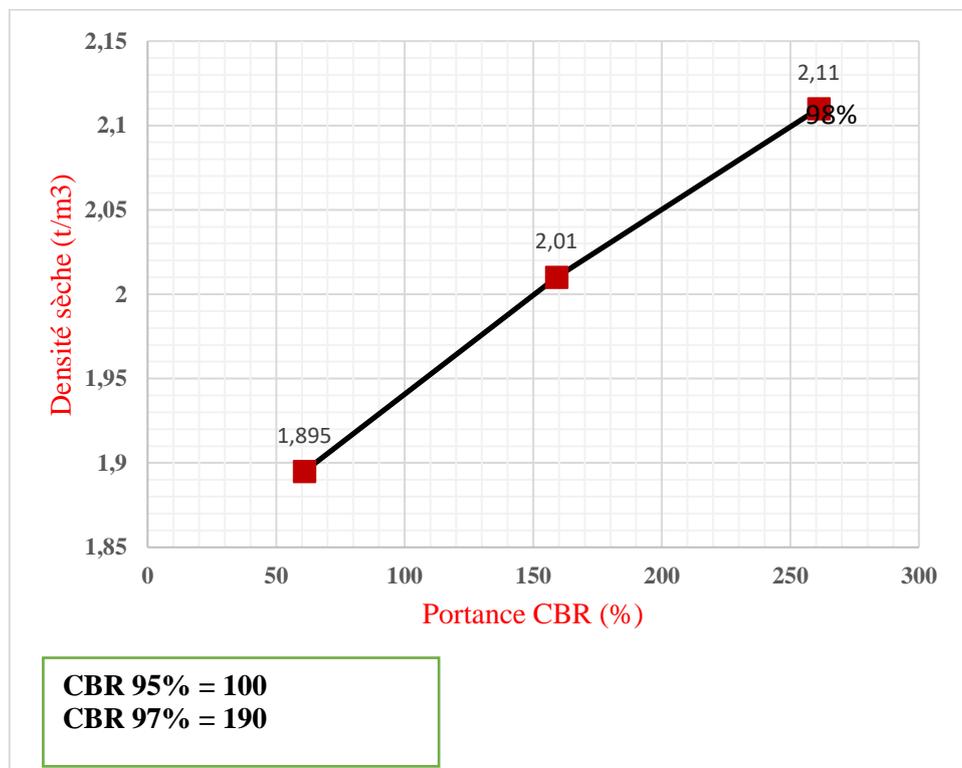
ANNEXE 3 : ESSAI GEOTECHNIQUE SUR LE MATERIAU AMELIORE A PLUSIEURS DOSAGES DE CIMENT

1. Matériau amélioré à 1% de ciment
 - a. Essai Proctor 1% ciment

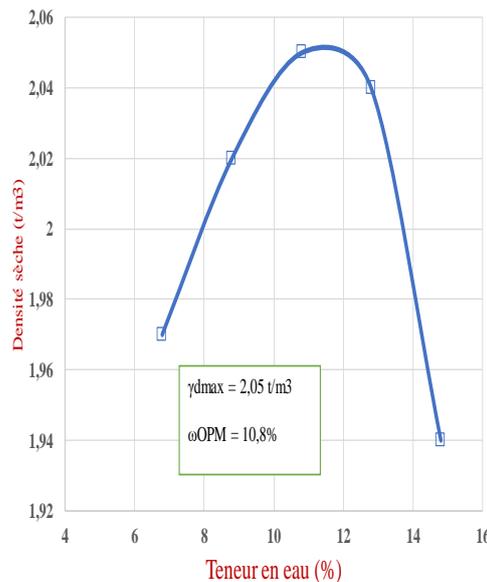
		ESSAI PROCTOR MODIFIE Grave Naturelle Sélectionnée Norme NF P 94-093/NF EN 13286-2													
Pays: BURKINA FASO		Chantier : Aéroport de Donsin Lot2A. Chaussées aéronautiques													
N°Echantillon : 950															
Nature matériau : GAL + 1% ciment															
Provenance : Piste coté droit PK02+200 au PK02+400															
Lieu prélèvement : couche de forme															
Date d'essai : 24/06/2022															
Opérateur : Sylvie KOALA															
		<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Teneur en eau optimum; %</td> <td style="text-align: center;">10,6</td> </tr> <tr> <td>DENSITE SECHE MAX;t/m³</td> <td style="text-align: center;">2,08</td> </tr> </table>										Teneur en eau optimum; %	10,6	DENSITE SECHE MAX;t/m³	2,08
Teneur en eau optimum; %	10,6														
DENSITE SECHE MAX;t/m³	2,08														
ESSAI N°	1	2		3			4		5						
Masse du moule	3696	3696		3696			3696		3696						
Poids Total Humide (Moule+matériau)	8183	8483		8450			8267		7952						
Volume du moule	2049	2049		2049			2049		2049						
Masse de matériau humide	4487	4787		4754			4571		4256						
N° de tare	A8	T45	E1	A10	E9	M51	T04	A12	M36	M49					
Poids Tare	44	76	60	56	57	60	58	60	58	64					
Masse Totale matériau humide	461	475	510	448	419	490	508	482	406	457					
Masse Totale matériau sec	436	452	475	417	386	450	458	438	362	406					
Masse du matériau sec	392	376	415	361	339	390	400	378	304	342					
Masse d'eau	25	23	35	31	33	40	50	44	44	51					
Teneur en eau	6,3	6,1	8,4	8,6	10,7	10,5	12,5	11,6	14,5	14,9					
Teneur en eau moyenne	6,2		8,5		10,6			12		14,7					
DENSITE HUMIDE	2,075		2,14		2,245			2,32		2,23					
DENSITE SECHE	1,9		2,05		2,09			2,07		1,92					

b. Essai CBR 1% ciment

ESSAI DE PORTANCE CBR					
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR	Teneur en eau		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
56	2,11	190	10,3	11,7	
25	2,02	100		12,7	0,02%
10	1,9	39		13,7	0,02%

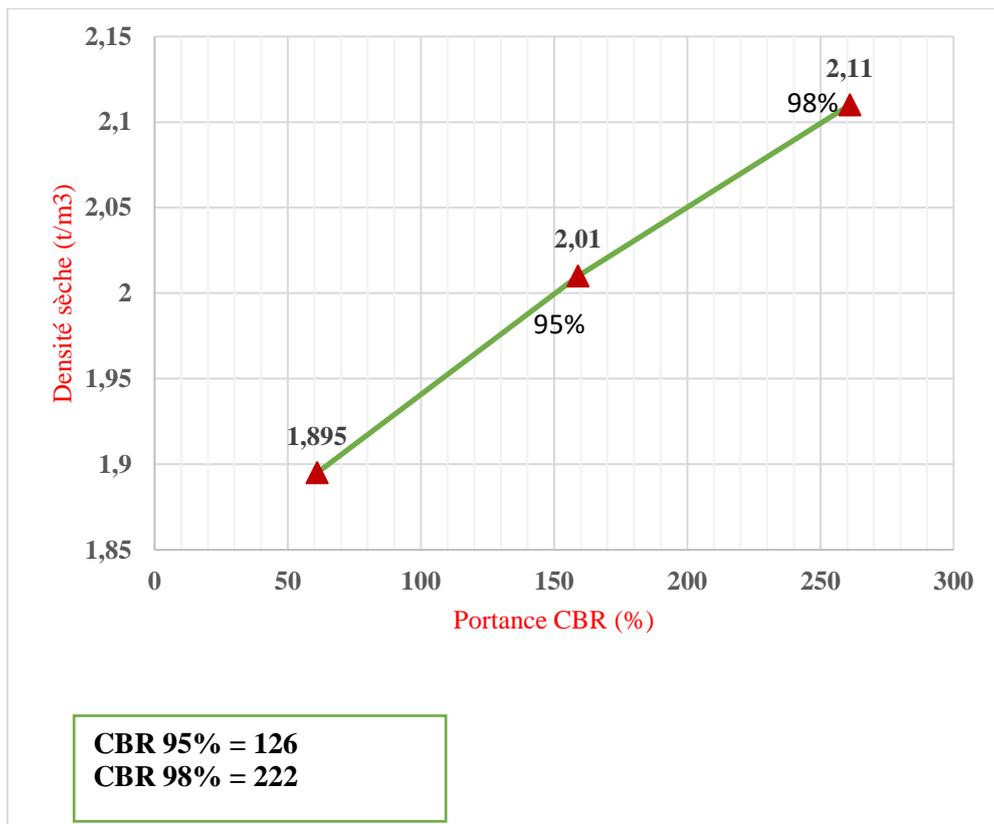


2. Matériau amélioré à 1.5% ciment
a. Essai Proctor 1,5%

 		ESSAI PROCTOR MODIFIE Grave Naturelle Sélectionnée Norme NF P 94-093/NF EN 13286-2													
Pays: BURKINA FASO					Chantier : Aéroport de Donsin Lot2A. Chaussées aéronautiques										
N° Echantillon : 950															
Nature matériau : GAL + 1,5% ciment															
Provenance : Piste coté droit PK02+200 au PK02+400															
Lieu prélèvement : couche de forme															
Date d'essai : 24/06/2022															
Opérateur : Sylvie KOALA															
															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Teneur en eau optimum; %</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">10,8</td> </tr> <tr> <td>DENSITE SECHE MAX;t/m³</td> <td style="text-align: center;">2,05</td> </tr> </table>												Teneur en eau optimum; %	10,8	DENSITE SECHE MAX;t/m³	2,05
Teneur en eau optimum; %	10,8														
DENSITE SECHE MAX;t/m³	2,05														
ESSAI N°	1		2		3		4		5						
Masse du moule	3696		3696		3696		3696		3696						
Poids Total Humide (Moule+matériau)	7964		8265		8490		8449		8230						
Volume du moule	2049		2049		2049		2049		20						
Masse de matériau humide	4288		4569		4794		4753		2049						
N° de tare	M17	M12	T97	F16	B17	F13	C5	AA17	T54	M30					
Poids Tare	61	63	85	73	72	72	76	68	78	58					
Masse Totale matériau humide	430	365	521	478	447	454	471	416	488	534					
Masse Totale matériau sec	408	348	488	447	412	418	429	378	437	476					
Masse du matériau sec	347	285	403	374	340	346	353	310	359	418					
Masse d'eau	22	17	33	31	36	36	42	38	51	58					
Teneur en eau	6,9	6,7	8,7	8,9	10,8	10,8	12,6	13	14,9	14,7					
Teneur en eau moyenne	6,8		8,8		10,8		12,8		14,8						
DENSITE HUMIDE	2,09		2,23		2,34		2,32		2,21						
DENSITE SECHE	1,97		2,02		2,12		2,04		1,94						

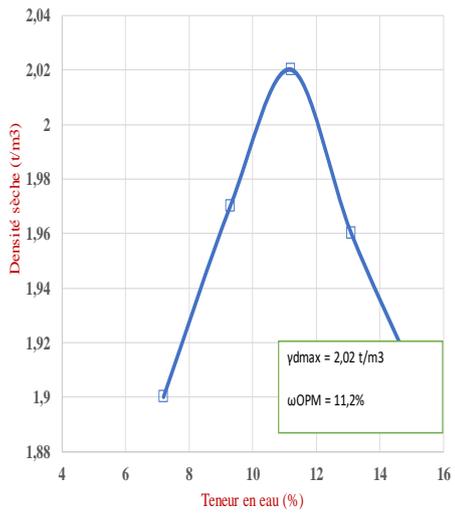
b. Essai CBR 1,5% ciment

ESSAI DE PORTANCE CBR					
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR	Teneur en eau		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
56	2,11	222	10	11,5	
25	2	126		12,7	0,02%
10	1,89	50		13,7	0,02%



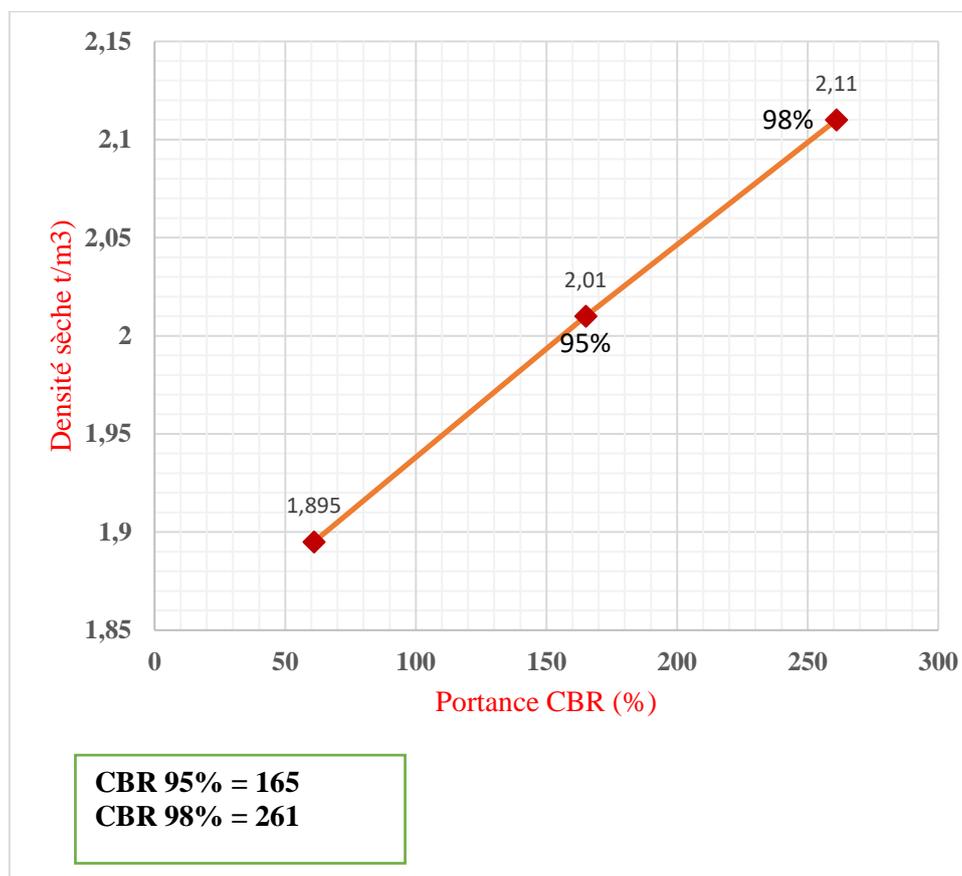
3. Matériau amélioré à 2% de ciment

a. Résultats Essai Proctor 2% ciment

 		ESSAI PROCTOR MODIFIE Grave Naturelle Sélectionnée Norme NF P 94-093/NF EN 13286-2													
Pays: BURKINA FASO		Chantier : Aéroport de Donsin Lot2A. Chaussées aéronautiques													
N° Echantillon : 950															
Nature matériau : GAL + 2% ciment															
Provenance : Piste coté droit PK02+200 au PK02+400															
Lieu prélèvement : couche de forme															
Date d'essai : 24/06/2022															
Opérateur : Sylvie KOALA															
										<table border="1"> <tr> <td>Teneur en eau optimum; %</td> <td>11,2</td> </tr> <tr> <td>DENSITE SECHE MAX:t/m³</td> <td>2,02</td> </tr> </table>		Teneur en eau optimum; %	11,2	DENSITE SECHE MAX:t/m³	2,02
Teneur en eau optimum; %	11,2														
DENSITE SECHE MAX:t/m³	2,02														
ESSAI N°	1	2		3			4		5						
Masse du moule	3696	3696		3696			3696		3696						
Poids Total Humide (Moule+matériau)	7976	8483		8450			8267		7952						
Volume du moule	2049	2049		2049			2049		2049						
Masse de matériau humide	4280	4787		4754			4571		4256						
N° de tare	C4	A37	KS	T3	M25	C13	A42	T4	F43	AA4					
Poids Tare	71	77	58	76	58	70	75	73	62	65					
Masse Totale matériau humide	546	565	395	454	545	510	575	620	685	572					
Masse Totale matériau sec	515	535	369	425	502	471	522	560	607	516					
Masse du matériau sec	444	458	311	349	444	401	447	487	545	451					
Masse d'eau	31	30	26	29	43	39	53	60	78	62					
Teneur en eau	7	7,3	9,3	9,3	11,4	11	13	13,2	15,5	14,5					
Teneur en eau moyenne	7,2	9,3		11,2			13,1		15						
DENSITE HUMIDE	2,08	2,18		2,33			2,32		2,23						
DENSITE SECHE	1,9	1,97		2,02			1,96		1,91						

b. Essai CBR 2% ciment

ESSAI DE PORTANCE CBR					
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours			
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR	Teneur en eau		Gonflement (%)
			Moulage	Après essai	
56	2,11	261	10,8	11,8	0,01%
25	2,01	159		12,9	
10	1,895	61		13,8	



ANNEXE 4 : L'ESSAI DE COMPACTITE ET DE PORTANCE A LA PLAQUE STATIQUE.

1. Essai de compacité au gammadensitomètre

✚ Principe et méthode

C'est un appareil radioactif, il mesure la compacité sur place. Il permet de contrôler les compacités des couches mises en œuvre et du sol support après introduction d'une densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié, le Troxler nous détermine : la densité sèche et humide, la teneur en eau, la compacité de l'état du sol en place.

✚ Résultats

 		Compacité au gammadensimètre à pointe NF P94-061-1			
Chantier : Aéroport de Donsin Lot 2A Chaussées aéronautiques					
Pays : Burkina Faso					
Provenance : Piste coté de droit PK 02+200 au PK 02+400					
Lieu : Couche de forme			Matériaux : GAL		
Date d'essai : 05-07-22			Opérateur: Sylvie KOALA		
Référence du matériau : w: 11,2 yd: 2,02					
PK ou Profil	Position	Densité in situ		Compacité	
		yh	%w	yd	%
02+200	Axe	2186	8	2023	95,9
	Droit	2217	8,6	2041	96,7
	Gauche	2252	8,2	2081	98,6
02+220	Axe	2319	9,4	2120	100
	Droit	2287	8	2118	99,9
	Gauche	2294	8,9	2107	99,4
02+240	Axe	2244	7,5	2088	98,5
	Droit	2306	8,9	2118	99,9
	Gauche	2269	9,1	2080	98,1
02+260	Axe	2282	8,1	2120	100
	Droit	2249	8,3	2077	98
	Gauche	2364	11,5	2120	100
02+280	Axe	2284	8,2	2111	99,6
	Droit	2294	8,2	2120	100
	Gauche	2288	8,5	2109	99,5
02+300	Axe	2259	8,1	2090	98,6
	Droit	2296	8,3	2120	100
	Gauche	2284	9	2096	98,9
02+320	Axe	2324	11,2	2090	98,6
	Droit	2270	9,3	2077	98
	Gauche	2286	10,3	2073	97,8
02+340	Axe	2305	9,7	2101	99,1
	Droit	2315	10,2	2101	99,1
	Gauche	2305	9,1	2113	99,7
02+360	Axe	2252	7,1	2103	99,2
	Droit	2317	9,4	2118	99,9
	Gauche	2259	8,3	2086	98,4
02+380	Axe	2286	8,4	2109	99,5
	Droit	2271	7,8	2107	99,4
	Gauche	2284	9,3	2090	98,6
02+400	Axe	2269	8,8	2086	98,4
	Droit	2274	9,5	2077	98
	Gauche	2341	10,8	2113	99,7

2. Essai de portance à la plaque statique

✚ Principe et méthode

Objet de l'essai

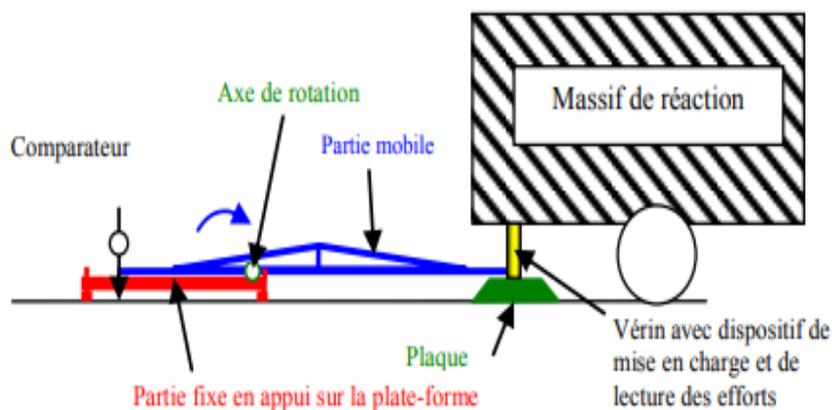
L'essai s'applique aux plates-formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement destinées à la construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et réalisées avec les matériaux définis dans la classification de la norme NF P 11-300 à l'exception de ceux comportant des éléments dont le D_{max} excède 200mm.

La valeur maximale du pouvant être mesurée par cet essai est de 250 MPa.

Cet essai consiste à évaluer la déformabilité d'un sol (tassement s de la plaque) en effectuant deux cycles de chargement à vitesse constante (80daN/s) sur une plaque de 60 cm de diamètre.

Procédure de l'essai

La plaque est disposée sur le matériau à tester avec une interposition d'une fine couche de sable. Un vérin de 200KN, surmonté d'une cellule dynamométrique transmet la charge à la plaque en prenant appui sous un camion chargé. Les déformations sont mesurées à l'aide d'une poutre de Benkelman comportant un comparateur au centième.



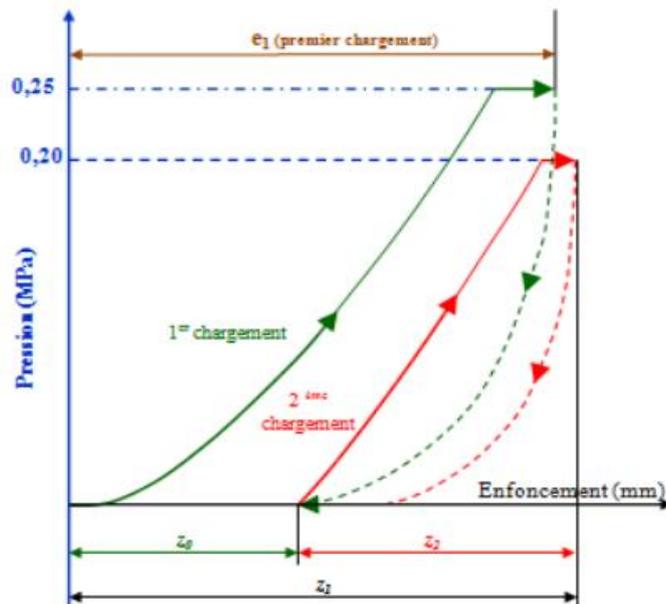
L'essai comprend deux cycles de chargement :

- 1ere cycle de chargement de 0 à 0.25 MPa ($F = 7068 \text{ daN}$)

La pression est maintenue jusqu'à stabilisation de la déformation ($< 0.02 \text{ mm}/15\text{s}$). Mesure de l'enfoncement z_0 (mm), puis déchargement.

- 2eme cycle de déchargement de 0 à 0.20 MPa ($F = 5645\text{daN}$)

Après stabilisation de la déformation ($< 0.02 \text{ mm}/15\text{s}$), mesure de l'enfoncement z_2 (mm), puis déchargement.



Interprétation

Le module de déformation à la plaque EV2 de la plateforme au point d'auscultation est déterminé à partir de la formule de Boussinesq :

Le module de déformation du sol (Boussinesq : $EV2 = \frac{\pi}{4} * (1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot d}{z_2}$; en Mpa) est déduit en interprétant la valeur du déplacement vertical (z en mm), mesuré en fonction de la charge appliquée (en kN).

Les charges définies sont de 70 kN pour le premier chargement de la plaque et 56 kN pour le second chargement. Avant tout essai il est obligatoire de stabiliser le sol avec un chargement de 5kN.

EV2 est le module de déformation du sol à la plaque au second cycle de chargement,

$$EV2 = \frac{90}{w2} \quad w2 : \text{déflexion sous le 2}^\circ \text{ chargement 56 kN}$$

EV1 est le module de déformation du sol au premier chargement.

$$EV1 = \frac{112}{w1} \quad w1 : \text{déflexion sous le 1}^\circ \text{ chargement 70 kN}$$

La portance de la couche de forme est déterminée par son module de déformation réversible mesuré avec l'essai de plaque (norme NF P 94-117-1), module **EV2**. Le module EV2 est également utilisé dans le cas du dimensionnement.

$k = \frac{EV2}{EV1}$ est le rapport des modules à la plaque de deux chargements successifs pour

déterminer si le compactage est suffisant.

Le compactage est d'autant meilleur que le rapport k est faible ; en général la spécification conventionnelle admet une valeur du rapport $k < 2$.

📊 Résultats

  <small>P.O. Box 888, 13000 Sabah, Kuwait Hamad Al-Sagoff Street Al-Khazal Tower, 12th Floor P.O. No. 2574, Al-Qadisia Kuwait City Tel : 22323310 Fax : 22323314</small>		PORTANCE DES PLATES-FORMES: Module EV2 sous le chargement statique NF P 94-117-1								
Provenance du matériau : Piste coté droit					PK 2+200 au PK 2+400					
Couche: couche de forme sol ciment					Opérateur : Sylvie KOALA					
PK ou Profil	positions	1er cycle de chargement			2e cycle de chargement			Modules de déformations		
		Lecture au 1/1000mm	Tassement au 1/1000mm	Déflexion w1 sous 7070kg (mm)	Lecture au 1/1000mm	Tassement au 1/1000mm	Déflexion w2 sous 5650kg (mm)	EV1 1125/w1 (bars)	EV2 900/w2 (bars)	k EV2/EV1
2+200	gauche	23	46	0,46	15	30	0,3	2446	3000	1,23
	droit	25	50	0,5	18	36	0,36	2250	2500	1,11
2+220	gauche	27	54	0,54	18	36	0,36	2083	2500	1,20
	droit	29	58	0,58	16	32	0,32	1940	2813	1,45
2+240	gauche	25	50	0,5	17	34	0,34	2250	2647	1,18
	droit	26	52	0,52	14	28	0,28	2163	3214	1,49
2+260	gauche	24	48	0,48	18	36	0,36	2344	2500	1,07
	droit	25	50	0,5	16	32	0,32	2250	2813	1,25
2+280	gauche	23	46	0,46	16	32	0,32	2446	2813	1,15
	droit	30	60	0,6	19	38	0,38	1875	2368	1,26
2+300	gauche	17	34	0,34	12	24	0,24	3309	3750	1,13
	droit	26	52	0,52	12	24	0,24	2163	3750	1,73
2+320	gauche	23	46	0,46	15	30	0,3	2446	3000	1,23
	droit	21	42	0,42	12	24	0,24	2679	3750	1,40
2+340	gauche	26	52	0,52	11	22	0,22	2163	4091	1,89
	droit	26	52	0,52	19	38	0,38	2083	2368	1,18
2+360	gauche	20	40	0,4	10	20	0,2	2813	4500	1,60
	droit	28	56	0,56	19	38	0,38	2009	2368	1,18
2+380	gauche	27	54	0,54	19	38	0,38	2083	2368	1,14
	droit	27	54	0,54	19	38	0,38	2083	2368	1,14
2+400	gauche	22	44	0,44	11	22	0,22	2557	4091	1,60
	droit	27	54	0,54	19	38	0,38	2083	2368	1,14

