



REPUBLIQUE DU BENIN

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI (EPAC)



CENTRE AUTONOME DE PERFECTIONNEMENT

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

RAPPORT DE STAGE DE FIN DE FORMATION

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE LA LICENCE PROFESSIONNELLE

SUIVI DES ETUDES GEOTECHNIQUES DANS LE CADRE DU
PROJET DE REALISATION DE REMBLAIS TECHNIQUES ET DE
RECHARGEMENT DE LA VOIE OUEDEME-DANSIHOU SUR
UN LINEAIRE DE 2,900 KM DANS LA COMMUNE DE LOKOSSA

Rédigé par : HOUESSINON Samson Roland

Encadreur :

Ir. Doc. Hervé ZETOME

Superviseur :

KOUDJE Basile,

Ingénieur de conception en Génie Civil,
Administrateur en Economie des Transports,
en Gestion des Projets et en Gestion des
Marchés Publics

Un savoir sans travail est un fardeau sans chameau.

Proverbe Égyptien

FICHE DE CERTIFICATION DE L'ORIGINALITE DU RAPPORT DE
STAGE

Je soussigné, M. **HOUESSINON Samson Roland**, certifie que ce travail réalisé sous la supervision de M. **KOUDJE Basile**, est original et n'a jamais été présenté pour l'obtention de quelque grade universitaire que ce soit.

L'auteur

Date : .../...../ 2024.....

Signature

HOUESSINON Samson Roland

Le Superviseur

Date : .../...../ 2024.....

Signature

Ir. Basile KOUDJE



Dédicace

Je dédie ce mémoire :

- À Dieu tout puissant pour nous avoir donné la santé tout au long de ce stage de fin de formation.
- A mon père **HOUESSINON Yéoumè Anatole**, pour les sacrifices et les luttes que tu as menés à mon égard; c'est toi qui pour le bien être de tes enfants qui ne t'es jamais lassé de te battre pour leurs réussite, voici le fruit de tes efforts.
- A ma mère **GNENDA Akouavi Béatrice** ton courage et ton amour ont fait de moi ce que je suis; tu es pour moi une source intarissable d'enthousiasme et d'espoir pour ta patience et de tous les sacrifices consentis. Puisse Dieu te bénir et te protéger.
- A mon épouse **CODO Blandine** et à mes enfants pour leurs soutiens moraux et leurs conseils. Trouvez ici la preuve de ma reconnaissance.
- tous les personnels du SNERTP S.A de m'avoir accordé leurs l'assistance dans l'exécution de tous les essais géotechniques liés à ce projet.



Remerciements

Profonde reconnaissance et remerciements chaleureux à l'endroit de :

- ✚ Ing. **KOUDJE Basile**, notre maître de mémoire, Ingénieur de conception en Génie Civil, Administrateur en Economie des Transports, en Gestion des Projets et en Gestion des Marchés Publics, pour avoir accepté d'encadrer ce travail et de le conduire jusqu'au bout. Ce document n'aurait pu être réalisé sans ses conseils, sa disponibilité, son enthousiasme, son esprit d'écoute, son soutien sans pareils et surtout cette confiance qu'il a placée en nous ;
- ✚ **Dr Valéry K. DOKO**, Maître de Conférences des Universités, Chef de Département de génie civil de l'EPAC;
- ✚ **Dr Guy Alain ALITONOU**, professeur titulaire des universités du CAMES, Directeur de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) ;
- ✚ **Dr Vincent PRODJINONTO**, professeur titulaire des universités du CAMES, Directeur-Adjoint de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) ;
- ✚ **Pr GIBIGAYE Mohamed**, le Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC ;
- ✚ **Dr KIKI TANKPINOU Yvette**, maître de conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ **Dr Victor S. GBAGUIDI**, Directeur-Ajoint de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC;
- ✚ Dr. ADJOVI C. Edmond, Professeur Titulaire des Universités du CAMES,
- ✚ Dr. GBAGUIDI Gérard Aïssè, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. ZEVOUNOU Crépin, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. THCEHOUALI Adolphe, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. OLODO Emmanuel, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. CODO François de-Paule, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. DEGBEGNON Léopold, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. AÏNA Martin, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. ALLOBA Ezéchiel, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;



- ✚ **Dr. HOUANOU Agapi**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. BACHAROU Taofic, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. HOUINOU S. Agathe, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. SAVY Mathias, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- ✚ Feu Dr. ZINSOU Codjo Luc, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. WANKPO Tonalémi Epiphane Sonon, Docteur Ingénieur en Hydraulique ;
- ✚ Dr. YABI Crespine Prudence, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- ✚ Dr. GODONOU Gildas, Docteur Ingénieur en matériaux et structures ;
- ✚ aux éminents membres du jury ; merci d'honorer de votre présence la soutenance de nos travaux ;
- ✚ à tous les enseignants de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi, mes sincères remerciements ;
- ✚ au Personnel de l'administration de l'EPAC, pour l'excellence du cadre de travail mis à notre disposition et pour les moyens mobilisés pour notre formation ;
- ✚ à tous les responsables et au personnel du Centre Autonome de Perfectionnement, mes sincères remerciements ;
- ✚ à ma famille qui m'a toujours encouragé.

SOMMAIRE

⌘édicace	iv
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES PHOTOS	ix
Liste des tableaux	x
Liste des graphes	xi
LISTE DES ACRONYMES	xii
RESUME.....	xiv
Abstract	xv
INTRODUCTION.....	16
CADRE INSTITUTIONNEL ET METHODOLOGIQUE.....	2
DEROULEMENT DE STAGE.....	13
PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUTIONS, DIFFICULTES RENCONTREES ET SUGGESTIONS	70
CONCLUSION	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83
TABLE DES MATIERES	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi.....	6
Figure 2: Schéma descriptif de la localisation de la SNERTP S.A de Cotonou	8
Figure 3 : Organigramme de la SNERTP S.A de Cotonou.....	10
Figure 4: Différentes couches d'une chaussée revêtue.....	16
Figure 5 : Structure type d'une chaussée souple.....	17
Figure 6 : Structure type d'une chaussée rigide	17
Figure 7 : Situation géographique de la commune de Lokossa	21
Figure 8 : Évolution de la pluviométrie sur les cinq (05) dernières années dans la commune de Lokossa.....	22
Figure 9 : Pénétrromètre dynamique	25
Figure 10 : série des tamis normalisés avec l'appareil vibratoire	27
Figure 11 : composition d'un sol	37
Figure 12 : Les différents états d'un sol.....	39
Figure 13 : Ordre de grandeur du VBS	42
Figure 14 : Schéma récapitulatif de l'essai Proctor normal	50
Figure 15 : Matériels CBR:	53
Figure 16 : Principe de l'essai los Angeles	64
Figure 17 : principe de l'essai micro deval	67
Figure 18 : Coupe géologique du sol	71
Figure 19 : Courbe pénétrométrique	72



LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Entrée principale de l'Université d'Abomey-Calavi.....	3
Photo 2 : Vue de l'entrée de la SNERTP S.A.....	7
Photo 3 : Sondage à la tarière manuelle avec récupération de matériaux.....	24
Photo 4 : Appareillages pour réalisation de l'analyse granulométrique par sédimentometrie	32
Photo 5 : Essai en cours dans les deux éprouvettes	34
Photo 6 : Appareillage pour l'essai de limite d'ATTEMBERG	40
Photo 7: Coupelle rempli de matériau.....	41
Photo 8 : Appareillage pour l'essai de VBS.....	43
Photo 9 : Papier filtre tacheté	45
Photo 10 : Prélèvement de matériaux pour les essais d'identification.....	46
Photo 11 : Moule et dame Proctor normal et modifiée	48
Photo 12 : Étapes de préparation de l'échantillon	49
Photo 13 : Immersion des moules CBR	54
Photo 14 : Les étapes de poinçonnement	55
Photo 15 : Carrière de calcaire et de latérite	58
Photo 16 : Matériels pour réalisation de l'équivalent de sable	61
Photo 17 : Appareil de los Angeles.....	65
Photo 18 : mode opératoire de l'essai micro deval	68
Photo 19 : Appareil de micro deval, jarre et échantillon.....	68



Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des constats effectués sur la piste Ouèdemey-Dansihoué	20
Tableau 2 : Degré de plasticité des sols en fonction de l'indice de plasticité.....	41
Tableau 3 : Modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié	46
Tableau 4 : Portance en fonction de l'indice CBR.....	56
Tableau 5 : Classification des sols en fonction de leur portance	57
Tableau 6 : Classe de portance selon la méthode CEBTP français, 1984	57
Tableau 7 : Justification des valeurs de l'équivalent de sable	63
Tableau 8 : Caractéristique de l'essai MDE pour chaque classe granulaire	68
Tableau 9 : les valeurs des limites d'Atterberg	74
Tableau 10 : Résumé essais MO	75
Tableau 11 : Résultats de VBS.....	75
Tableau 12 : Résultats de l'essai CBR.....	77
Tableau 13 : Caractéristique géotechnique de l'emprunt de graveleux latéritique.....	78
Tableau 14 : Carrières d'approvisionnement des emprunts.....	78
Tableau 15 : Résultats des essais sur la plate-forme support de chaussée	79



Liste des graphes

Graphe 1 : Courbe granulométrique.....	73
Graphe 2: Limites d'Atterberg.....	74
Graphe 3 : Courbe Proctor	76
Graphe 4 : Courbe	77



LISTE DES ACRONYMES

SIGLES	DESIGNATION
EPAC	Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi
CAP	Centre Autonome de Perfectionnement
UAC	Université d'Abomey-Calavi
Kg	Kilogramme
m³	Mètre cube
m	Mètre

GLOSSAIRE

Thèmes	Définitions
Refus	C'est la partie de l'échantillon n'ayant pas traversé les mailles d'un tamis
Refus cumulé	C'est la somme de tous les refus, celui du tamis en question, plus ceux des précédents tamis (de maille plus grande). Il est exprimé en gramme ou en pourcentage de refus cumulés.
Pourcentage massique de refus	C'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
Pourcentage massique d'un tamisât	C'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture « d », à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille
La granulométrie	C'est la détermination de la grandeur des grains,
La granularité	C'est la répartition dimensionnelle des grains dans un granulat

RÉSUMÉ

Au bout des trois années de formation au Centre Autonome de Perfectionnement (CAP/EPAC) dans le cadre de l'obtention du diplôme de licence professionnelle en génie-civil, nous avons effectué un stage pratique de trois mois en vue d'acquérir de nouvelles connaissances dans la réalité professionnelle. La structure dans laquelle nous avons effectué ce stage est la Société Nationale d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (SNERTP S.A). Le suivi des travaux effectués dans la section route nous a permis de rédiger ce rapport qui déroule essentiellement sur les essais géotechniques menés en laboratoire et in situ. Notre rapport comporte trois chapitres à savoir :

- présentation des structures de formation et d'accueil
- les activités menées lors du stage
- développement du thème

En effet, nous avons fait une étude sur l'identification complète des graves latéritiques devant être utilisées pour la réalisation de la couche de fondation. Les résultats ainsi obtenus justifient que l'échantillon testé est une grave latéritique non plastique de classe A2-6 selon la classification HRB et de classe de portance S5 ou PF3.

Mots clés : Grave latéritique, couche de fondation, études géotechniques.

Abstract

At the end of three years of training at the Autonomous Improvement Center (CAP/EPAC) to obtain the professional license diploma in civil engineering, we completed a three-month practical internship in order to acquire new knowledge in the professional reality. The structure in which we carried out this internship is the Society National essays of the Recherche des Travail Publics (SNERTP S.A). Monitoring the work carried out in the road section allowed us to write this report which mainly covers the geotechnical tests carried out in the laboratory and in situ.

- presentation of training and reception structures.
- the activities conducted during the internship
- theme development which is: the results of the geotechnical studies carried out on the materials. In view of these results a classification of this soil was made.

In fact, we have done a study on the complete identification of the lateritic gravel to be used for the creation of the foundation layer. The results thus obtained justify that the tested sample is a non-plastic lateritic gravel of class A2-6 according to the HRB classification and of load-bearing class S5 or PF3.

Key words: Lateritic gravel, foundation layer, geotechnical studies.



INTRODUCTION






L'évolution de la technologie industrielle a impacté plusieurs secteurs surtout celui de génie civil où nous notons la construction des ouvrages de grandes envergures avec des matériaux très performants. Cette évolution enregistrée dans le monde de génie civil demande des connaissances théoriques et pratiques assez poussées.

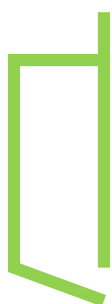
La route est un espace aménagé sur un terrain naturel préparé pour faciliter la circulation des biens et des personnes. Sa structure est un ensemble de couches de matériaux empilés les uns sur les autres pour résister aux sollicitations du trafic. Avant la réalisation de tout projet de construction routière, une identification complète à travers les essais géotechniques des matériaux est indispensable.

C'est dans cette démarche qu'à l'issue de notre formation, nous avons pu solliciter et obtenir un stage pratique de trois (03) mois au sein du laboratoire SNERTP S.A, qui se charge de la réalisation des études géotechniques dans le cadre du projet de réalisation des remblais techniques et rechargement de la voie Oudèmè-Dansihoué dans la commune de Lokossa. Avant de mieux décrire les différents travaux suivis au cours de notre stage, nous avons choisi de développer comme thème :

« Suivi des études géotechniques dans le cadre du projet de réalisation de remblais techniques et de rechargement de la voie Ouèdemè-Dansihoué sur un linéaire de 2,900 km dans la commune de Lokossa ».

Le présent rapport restitue la substance des différents travaux menés au cours de ce stage et s'articule autour des rubriques suivantes :

-  Chapitre 1 : Cadre institutionnel et méthodologique
-  Chapitre 2 : Déroulement du stage
-  Chapitre 3 : présentation et analyse des résultats, difficultés rencontrées et suggestions.



CADRE INSTITUTIONNEL ET METHODOLOGIQUE

Dans le but de pouvoir approfondir les connaissances théoriques acquises au cours de notre formation au Centre Autonome de Perfectionnement de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi, nous avons effectué un stage professionnel au sein de la Société Nationale d'Essais et des Recherches des Travaux Publics (SNERTP S.A) dont le siège est à AKPAKPA. Cette dernière est spécialisée dans les essais géotechniques et les expertises.

La première partie notre rapport sera consacré à la présentation de ces deux structures.

1.1 Présentation du Centre Autonome de Perfectionnement de l'EPAC

L'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi est un établissement de formation technique et professionnelle de l'Université d'Abomey-Calavi.



Photo 1 : Entrée principale de l'Université d'Abomey-Calavi

Elle est issue du fruit de la coopération Bénino-Canadienne et a ouvert ses portes à ses premiers étudiants en février 1977 sous la dénomination de CPU.

Il formait des Techniciens Supérieurs qui, après trois (03) ans de formation obtenaient le Diplôme d'Etudes Technique Supérieur (DETS), et bien plus tard des Ingénieurs des Travaux en quatre (04) ans de formation.

Par ailleurs, l'ex-CPU n'avait pas pour seule mission la formation des techniciens Supérieurs, mais aussi il y avait été mis en place un système d'enseignement basé sur un



programme de perfectionnement et de formation des personnels des entreprises. De jour en jour, ce centre a connu un essor prodigieux. Ledit programme intéresse notamment les anciens de Diplômés de l'ex-CPU et les professeurs d'Enseignements Techniques Secondaires. Il aide en l'occurrence les premiers à préparer pour les études d'ingénieur de conception en Génie Civil et en Géomatique ainsi que pour les DEA de Biologie Humaine Tropicale.

Un autre programme, celui consacré à la formation des formateurs a permis d'instaurer par exemple un DEA inter-africain de Sciences pour l'Ingénieur (SPI) et une formation doctorale dont l'importance pour la carrière des enseignants de l'ex-CPU se passe de tout commentaire.

Parallèlement à tout ce qui précède, il convient de mentionner que l'ex-CPU ne développait pas que des activités qui relèvent du domaine pédagogique. Il était aussi une institution prestataire de services à travers un certain nombre d'unités de production créées dans les différents départements ; à savoir :

- Le Centre Autonome de Perfectionnement (CAP)
- Le Centre Cunicole de Recherche et d'Information (Ce.Cu.R.I.)
- Le Centre Universitaire de Mécanique Générale (C.U.M.e.G.)
- L'Unité de Prestation de Service en Génie Electrique (U.P.G.E.)
- Le Centre Autonome de Radiologie (C.A.R.)
- Le Complexe Clinique Laboratoire Pharmacie Vétérinaires (CCLPV)
- Le Centre d'Entretien et de Réparation Automobile (CERA)
- Laboratoire d'Essais et de Recherches en Génie Civil (L.E.R.G.C. S.A.)
- Le Centre Universitaire de Promotion des Petites Entreprises (CUPPE) « créé au CPU pour aider les finissants à se prendre en charge eux-mêmes en créant leurs propres entreprises ».

A un moment donné, il était devenu une institution prête à générer dans un avenir proche des ingénieurs de conception ; ce qui d'ailleurs urgeait à partir du moment où, les besoins en formation d'ingénieurs devenaient de plus en plus pressants, obligeant ainsi à l'ouverture du second cycle.



Le 25 février 2005, le Président de la République, Chef de l'Etat, Chef du gouvernement, signe un Décret (N° 2005-078) portant création, attributions, organisation et fonctionnement de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), « une Ecole Supérieure à caractère de Grande Ecole » dépendant directement de L'Université d'Abomey-Calavi. Un an auparavant, c'est-à-dire depuis la rentrée académique 2003-2004, la première promotion d'étudiants de l'EPAC a dû effectuer sa rentrée en Prépa, Secteur Industriel ; et ce malgré toutes les difficultés inhérentes à toute entreprise humaine.

1.1.1 Historique du Centre Autonome de Perfectionnement (CAP)

Le Centre Autonome de Perfectionnement de l'EPAC (CAP/EPAC) est une composante de la catégorie des Unités d'Application créée à l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), laquelle relève elle-même de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). Il est doté de l'autonomie de gestion, et se trouve régi par un certain nombre de textes règlementaires, relatifs à ses Attributions, Organisation et Fonctionnement (A.O.F.). On citera le décret n°2005-078 du 25/02/2005 modifiant le décret n°2002-551 du 16/12/2002 portant Création et A.O.F. de l'EPAC, l'arrêté Ministériel n°2006-60/MESR/CAB/DC/SG/SP du 06/08/2006 portant A.O.F. de l'EPAC, la note de service n°037-04/EPAC/D/UAC du 27/02/2004, portant Création et A.O.F. du CAP de l'EPAC. Ce dernier (EPAC) est un établissement d'enseignement technique et professionnel créé le 16 décembre 2002 par décret. Il est issu de la transformation de l'ex-Collège Polytechnique Universitaire (ex-CPU), fruit de la coopération Bénino-Canadienne qui avait ouvert ses portes à ses premiers étudiants en février 1977. Le CAP est composé de quatre (04) divisions qui assurent chacune, l'exécution des tâches spécifiques liées à la scolarité et aux examens. Ce sont :

- La Division de la Formation A Distance (DFAD)
- La Division de la Formation Continue Présentielle (DFCP)
- La Division du Perfectionnement (DP)
- La Division des Finances et de la Comptabilité (DFC).

A ces divisions s'ajoute un Secrétariat Administratif qui est directement rattaché au responsable du CAP.

Trois modes de formation sont offerts. Ce sont :

- La formation à distance



- La formation continue présentielle
- La formation continue de perfectionnement.

La formation à distance et la formation continue présentielle sont des formations diplômantes. En ce qui concerne le perfectionnement, il peut se donner sur un site d'entreprise ou au CAP, ou même en combinant les 2 modes. Il s'agit essentiellement de formations qualifiantes.

1.1.2 Filières et Diplômes

Le Centre Autonome de Perfectionnement forme à distance les personnes titulaires d'un baccalauréat scientifique, technique ou de tout diplôme équivalent, conformes avec la spécialité choisie. Les offres exécutées au CAP en formation continue sont en général les mêmes que celles déroulées en formation initiale à l'EPAC. L'ouverture d'une offre dépend du nombre de candidats désireux de s'inscrire dans cette offre.

1.1.3 Situation géographique

Le Centre Autonome de Perfectionnement de l'EPAC (CAP/EPAC) a son siège sur le domaine de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) qui est situé à l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin.



Figure 1 : Situation géographique de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi

Source : <https://www.eos.com>

Pour compléter la formation reçue à l'EPAC-UAC, un stage pratique de fin de formation est exigé par les autorités de notre illustre institut. C'est dans cette optique, que nous avons été mis à la disposition de la Société Nationale d'Essais et des Recherches des Travaux Publics (**SNERTP S.A**) pour un stage de trois (03) mois.

1.2 Présentation de la SNERTP S.A

1.2.1 Historique de la SNERTP S.A

Le Laboratoire National de Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) créé en 1950 par les français s'est transformé en 1975 pour devenir le Centre Nationale d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP) à cause de la nationalisation des entreprises menées par le régime révolutionnaire d'alors et devient en 2024 la Société Nationale d'Essais et des Recherches des Travaux Publics (SNERTP S.A). Cette Société a un capital social qui est composé des immeubles et des matériels fixes d'exploitations appartenant au Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics. La Société joue pleinement le rôle d'un organisme scientifique et technique mis à la disposition des services publics et organisme privée pour les études du sol et le contrôle géotechnique des travaux. Ce laboratoire intervient avant, pendant et après la construction de tout ouvrage, par le contrôle rigoureux de la qualité des matériaux de construction à travers de multiples essais.



Photo 2 : Vue de l'entrée de la SNERTP S.A

Source : SNERTP S.A



1.2.2 Situation géographique

La SNERTP S.A est située au Bénin et plus précisément dans la capitale économique Cotonou ; Akpakpa quartier Fifadji Houto, à 200 mètres du carrefour SOEBBRA. Sa situation géographique est la suivante :

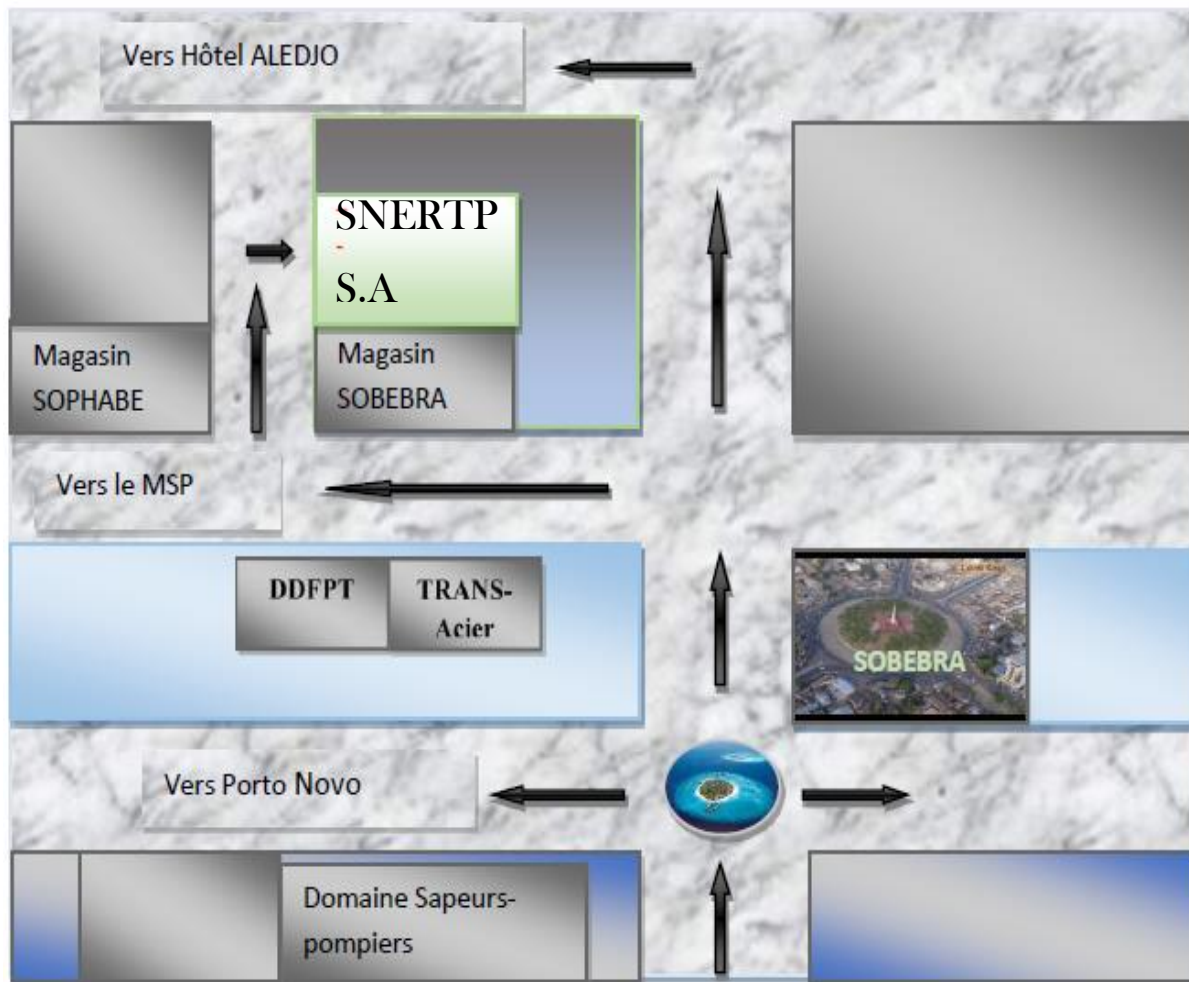


Figure 2: Schéma descriptif de la localisation de la SNERTP S.A de Cotonou

Source : SNERTP S.A

Fiche d'identification de la SNERTP S.A :

Dénomination : Société Nationale d'Essais et de Recherches et des Travaux Publics (SNERTP S.A)

- Adresse : 01 BP 1270 Cotonou BENIN
- Tél : 21 33 09 78 / 21 33 52 48
- Fax (229) 21 33 52 46
- E-mail : cnertp@internet.bj



1.2.3 Missions et attributions de la SNERTP S.A

La SNERTP S.A a pour mission :

- D'assurer le contrôle de la qualité des matériaux et de leur mise en œuvre
- De participer à l'élaboration des normes et de veiller à leur application dans le domaine du bâtiment et des travaux publics
- De promouvoir et de développer la recherche en matière de bâtiment et de travaux publics
- De donner des agréments techniques relatifs aux matériaux et aux procédés de mise en œuvre
- Pour atteindre ses objectifs, la SNERTP S.A se doit d'être une structure très bien organisée donc dirigée par une administration hiérarchisée et compétente en raison de la complexité de la tâche qui lui est assignée.

1.2.4 Organigramme De la SNERTP S.A

La Société National d'Essais et des Recherches des Travaux Publics (SNERTP S.A) est actuellement dirigé par Dr **Kassa Issifou MOUNOU SAMBIENI**. La SNERTP S.A dispose d'un personnel compétent, dynamique, convivial et rompu à la tâche. Le personnel du centre est hiérarchisé comme l'indique l'organigramme ci-après.

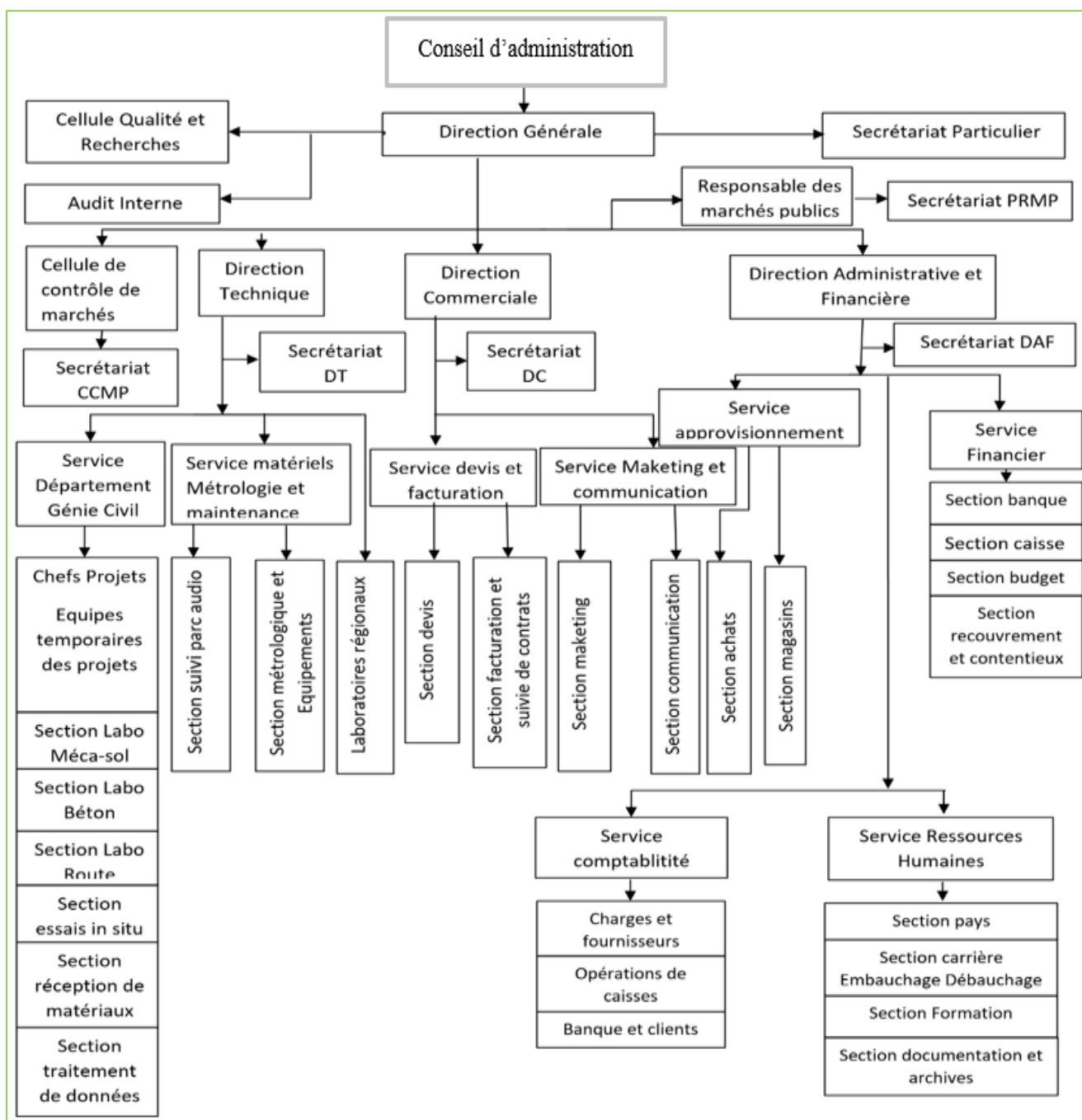


Figure 3 : Organigramme de la SNERTP S.A de Cotonou

Source : SNERTP S.A

1.2.5 Activité de la SNERTP S.A

A la SNERTP, les activités sont réparties dans quatre sections afin de mieux répartir les tâches pour mieux les exécuter. Ainsi, nous avons :

- **La section route :**

Elle s'occupe :

- Des études géotechniques ferroviaires, routières, aéroportuaires.



- Du contrôle géotechnique des travaux ;

- **La section mécanique des sols :**

Elle s'occupe :

- des études géotechniques de fondation des ponts et divers ouvrages
- études et contrôles géotechniques des barrages et remblais
- du dimensionnement et des fondations et des ouvrages.

- **La section béton :**

Elle s'occupe :

- de la formulation du béton
- du contrôle de la résistance des ouvrages
- des essais entrants dans la vérification de la qualité du béton.

- **La section essais spéciaux :**

Elle s'occupe :

- des essais en vue du contrôle de qualité des matériaux de construction
- du contrôle de la qualité du béton
- du contrôle de la qualité des matériaux de construction importés.

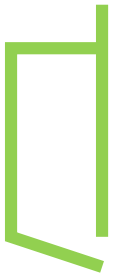
1.3 Démarche méthodologique

En effet la méthodologie est l'ensemble des démarches utilisées dans un secteur d'activité. Elle s'occupe de l'activité générale qui permet d'acquérir des connaissances. Notre démarche méthodologique a suivi les étapes suivantes :

- **La recherche documentaire** : elle consiste à consulter les différents documents techniques en relation avec le projet afin de bien suivre l'exécution : les anciens rapports de stage notamment ceux traitant de la construction de la route ; la consultation sur web ; les cours de matériaux de construction et mécanique des sols.
- **La prise des notes sur le chantier** : elle consiste à recueillir les informations et explications journalières données par les différents intervenants sur le chantier.
- Ces notes sont :
 - Des réponses aux questions en vue d'avoir des éclaircissements sur des techniques ou modes d'exécutions des divers travaux
 - Les remarques et suggestions faites sur les travaux effectués
 - La consultation des personnes ressources : il s'agit des relations nouées avec des personnes lors de la quête d'informations. Dans notre cas, nous nous sommes rapprochés des intervenants sur le chantier



- La présentation des résultats obtenus
- L'analyse et vérification des résultats sur la base des informations obtenues sur le terrain et auprès des personnes ressources.
- L'élaboration du document s'est faite suivant deux grandes étapes à savoir :
 - Prise de connaissance des pièces graphiques
 - Synthèses et rédaction : cette dernière étape a consisté à mettre au propre les idées et informations recensées ainsi que les rapports journaliers effectués sur le chantier.



DEROULEMENT DE STAGE



1.4 Généralités sur la route

1.4.1 Définition





On appelle route, tout espace aménagé sur le terrain naturel préparé pour permettre la circulation des biens et des personnes.

1.4.2 Structure d'une route

Généralement, les sols ne peuvent supporter sans dommages des pressions induites par les pneumatiques de véhicules (1 à 7 kg/cm²). Pour les sols non résistants, les pneumatiques compriment le sol et il se forme une ornière. En revanche lorsque le sol est résistant, il s'affaisse sous le pneu et remonte au fur et à mesure de l'éloignement des pneumatiques. Toutefois des tassements résiduels subsistent ; ce qui induit aussi après plusieurs passages des ornières.

Il faut donc interposer un écran entre le véhicule et le sol support, pour répartir les charges sur une plus grande surface. Cet écran est constitué de plusieurs couches granulaires dont l'ensemble forme la structure de la route.

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

-  couche de forme
-  couche de fondation
-  couche de base
-  couche de surface.

1.4.3 Les différentes couches de chaussées

Il est surmonté généralement par une couche de forme. L'ensemble sol-support et couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée (éventuellement compris la sous-couche). La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure d'une part la protection du sol-support contre la pluie et les effets de cycle gel-dégel. D'autre part, elle permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai et d'améliorer la portance à long terme.

La couche de base et la couche de fondation

Ces couches forment le corps de chaussée proprement dit qui a le rôle de réception des charges produites par le trafic et les répartit sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables ; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la couche de forme.

La couche de surface

La couche de surface ou revêtement de la chaussée permet d'adoucir la surface de roulement, d'assurer la distribution des charges transmises dans la chaussée et dans le sol et de protéger l'assise contre l'action du trafic et des intempéries. La couche de surface est constituée de :

- la couche de roulement qui est la couche supérieure de la chaussée directement en contact avec les actions du trafic et du climat. Elle peut être en enduit superficiel ou en enrobé (enrobés denses, béton bitumineux)
- la couche de liaison qui assure (quand cela est nécessaire) la liaison entre la couche de roulement et l'assise.

Le mode de fonctionnement et de dégradation est différent d'une structure à une autre.

1.4.4 Les différents types de structures de chaussée

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

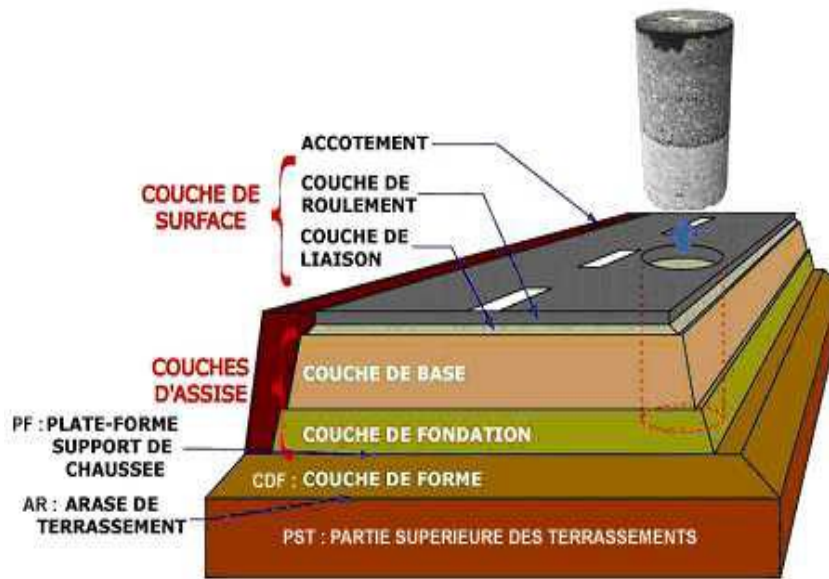


Figure 4: Différentes couches d'une chaussée revêtue

Source : <https://www.infociments.fr>

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

Les chaussées rigidifiées sont constituées par des dalles de béton de ciment. Les chaussées souples sont constituées par un empilage de matériaux pierreux recouverts de revêtement plus ou moins épais à base de bitume ou de goudron.

- **Les chaussées souples**

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

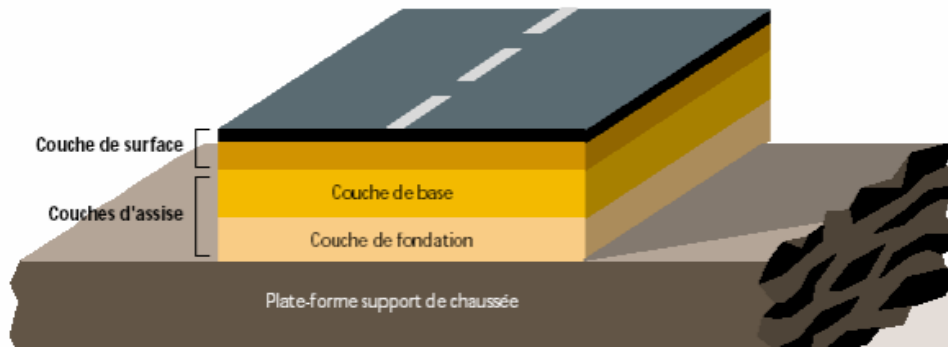


Figure 5 : Structure type d'une chaussée souple

Source : <https://www.infociments.fr>

La charge exercée sur la couche de surface est entièrement transmise au sol support de façon non uniforme avec une faible diffusion latérale. Les chaussées souples ne pouvant mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, l'étalement des efforts verticaux sur le sol support est modéré. Ceci a pour effet de localiser les pressions dans les couches sous-jacentes de manière à ce que l'effort sur la plate-forme soit compatible avec la résistance de l'infrastructure et du sol.

- **Les chaussées rigides**

Une chaussée rigide est constituée d'une dalle de béton de ciment Portland reposant sur un sol compacté, ou sur une mince couche de fondation de pierre ou de gravier concassé, ou sur une fondation stabilisée. La rigidité du revêtement permet de répartir les charges sur une grande superficie de la fondation. L'effet de répartition de la charge sur le sol support est alors très important. Les revêtements en béton ne requièrent pas de fondations épaisses, le rôle de ces dernières se bornant à empêcher les remontées de sol entre les dalles.

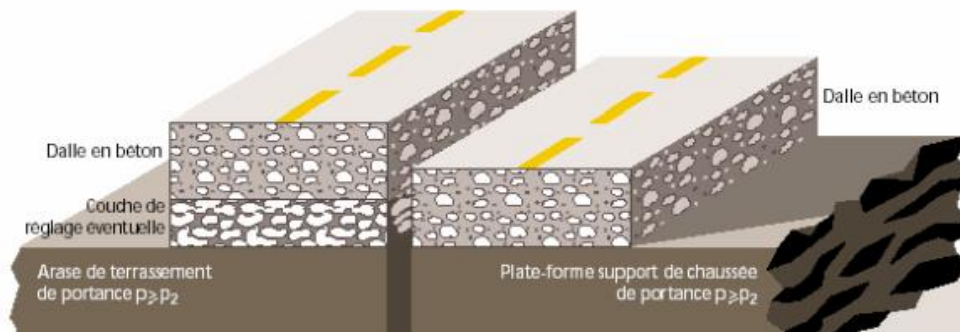


Figure 6 : Structure type d'une chaussée rigide

Source : <https://www.epdomain.com>



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

- **Les chaussées inverses**

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

- **Les structures mixtes**

Elles comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. De plus, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de 0,5

- **Les chaussées bitumineuses épaisses**

Elles se composent d'une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

- **Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques**

Elles comprennent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques.

1.5 Présentation du projet

L'axe OUEDEME-DANSIHOUE fait environ 5 km dont l'aménagement porte sur un linéaire de 2,900 km marqué par endroit par la présence d'eau. Il est inondé à la fois par le fleuve Mono d'une part et d'autre part la présence de la nappe phréatique suite aux forages réalisés dans les hameaux environnants. On constate une stagnation d'eau dans la zone suite à la réalisation des travaux d'aménagement et de bitumage de la voie Lokossa – Dédé-Aplahoué. La piste n'était pas du tout praticable dans la période d'étude et présente :

- de fortes zones marécageuses
- une largeur cyclable de 2 m à 4.5 m
- un relief qui n'est pas relativement plat
- des bourbiers sur plusieurs sections
- une stagnation à grande hauteur d'eau
- des sols latéritiques avec présence de tourbe
- une présence des graveleux latéritiques sur la piste.

Cette piste relie le village DANSIHOUE et de OUEDEME (Arrondissement de OUEDEME). Dans l'environnement immédiat de cet axe, on note la présence de palmiers

existant parmi les herbes, quelques bananeraies le long de la piste, et la présence d'agglomération en amont et en aval de la piste. Les types de dégradations observées se présentent comme suit :

- des marécages
- des accumulations d'eau, constat de quelques tronçons permanemment inondés.

S'agissant des infrastructures sociocommunautaires, on note leur absence tout le long de la piste. Les dégradations sont pour la plupart liées non seulement à la nature du sol, au relief, à la proximité du fleuve Mono mais aussi à l'inexistence des fossés latéraux et divergents. On y rencontre quelques ouvrages de franchissement qui témoignent que l'axe a connu ultérieurement des interventions en matière d'aménagement. Cependant, ces ouvrages pour la plupart sont défectueux et nécessitent pour certains des réfections et pour d'autres des démolitions en vue d'une reconstruction adéquate.

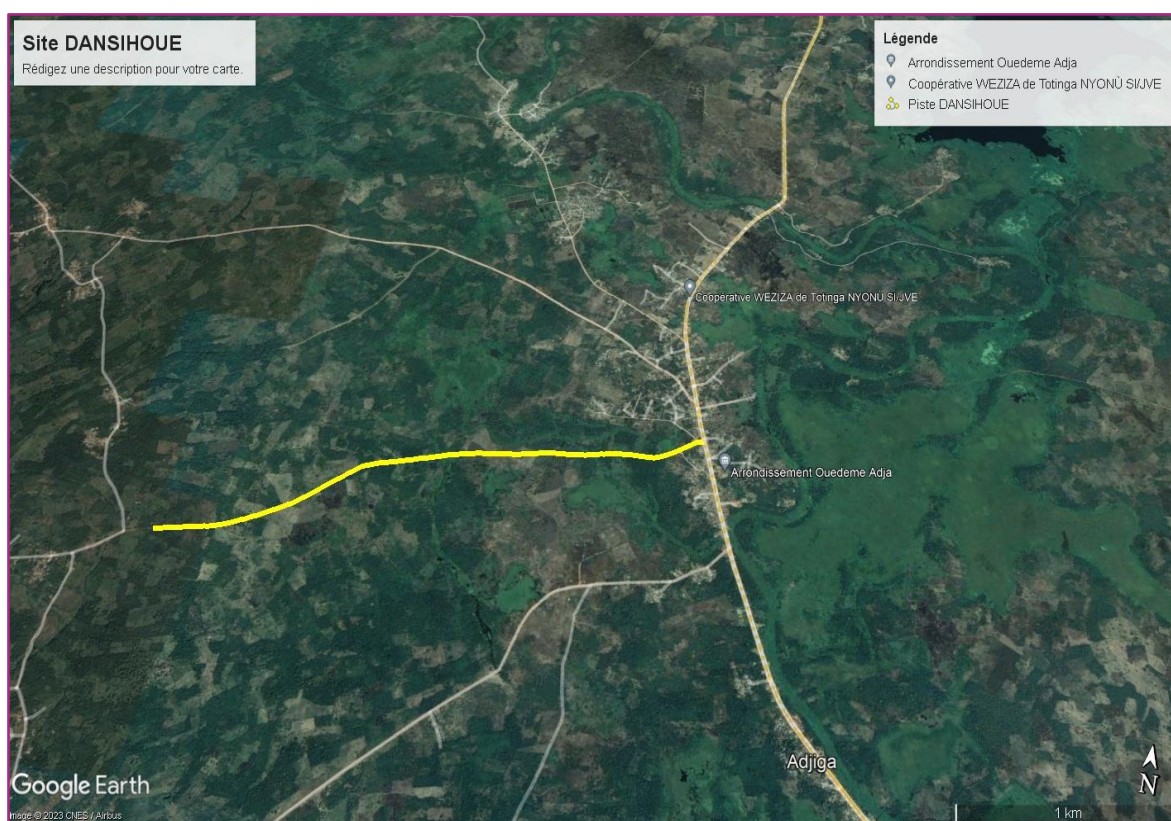


Image 1 : Image satellitaire montrant le tracé en plan du relief de l'ITR : piste OUÈDÈMEY – DANSIHOUÉ.

Source : [https:// www.eos.com](https://www.eos.com)

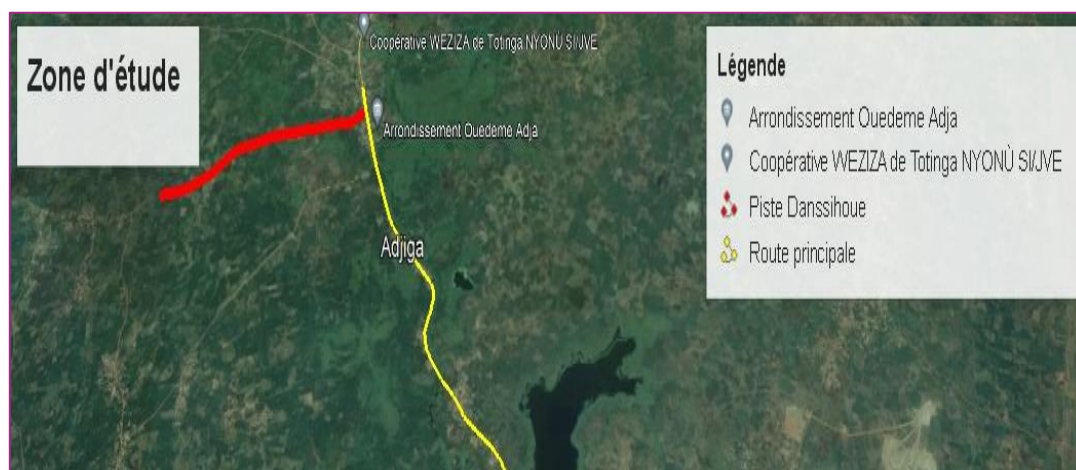


Image 2: Image satellitaire montrant le tracé en plan du relief de l'ITR : piste OUÈDÈMEY – DANSIHOUE

Source : [https:// www.eos.com](https://www.eos.com)

Tableau 1 : Récapitulatif des constats effectués sur la piste Ouèdemey-Dansihoué

Tronçon	Dégradation/Observation
0+000 à 0+77.04	-Zone sèche sur une distance de 77.04 ml -Piste envahie d'herbe -des broubiers sur plusieurs sections -Dégradation de la chaussée et Tas de sable
0+77.04 à 0+744.23	-Zone inondée sur une distance de 667.19 ml -Présence de dalot de 100x100 au PK 0+349.16 - Présence de dalot de 100x100 au PK 0+584.83 - Présence de dalot de 100x100 au PK 0+620.72 - Piste envahie d'herbe
0+744.23 à 1+300	-Zone sèche sur une distance de 555.77 ml -Piste envahie d'herbe -des broubiers sur plusieurs sections -Dégradation de la chaussée -Présence des palmiers dans l'emprise de la voie
1+300 à 1+475	Zone inondée sur une distance de 175 ml -Présence de dalot triple de 100x100 au PK 1+406 - Piste envahie d'herbe
1+475 à 2+900	Zone sèche sur une distance de 1425 ml -Piste envahie d'herbe -des broubiers sur plusieurs sections -Dégradation de la chaussée -Présence des palmiers dans l'emprise de la voie

1.6 Description de la zone projet

1.6.1 Le cadre physique : la situation géographique du projet

La Commune de LOKOSSA est située au Sud du Bénin, préfecture du Mono à plus de 650 Km de Cotonou et à 106 Km de Cotonou et s'étend sur une superficie de 260 Km² soit environ 16% de l'ensemble du département et 0,23% de l'ensemble du territoire national. Elle est située au 6°38'00'' de latitude Nord, au 1°43'00'' de longitude Est et se trouve dans la zone agro-écologique du bassin cotonnier. Elle est limitée :

- Au Sud par les communes d'Athiémé et de Houéyogbé
- A l'Est par la commune de de Bopa
- A l'Ouest par le territoire du Togo.

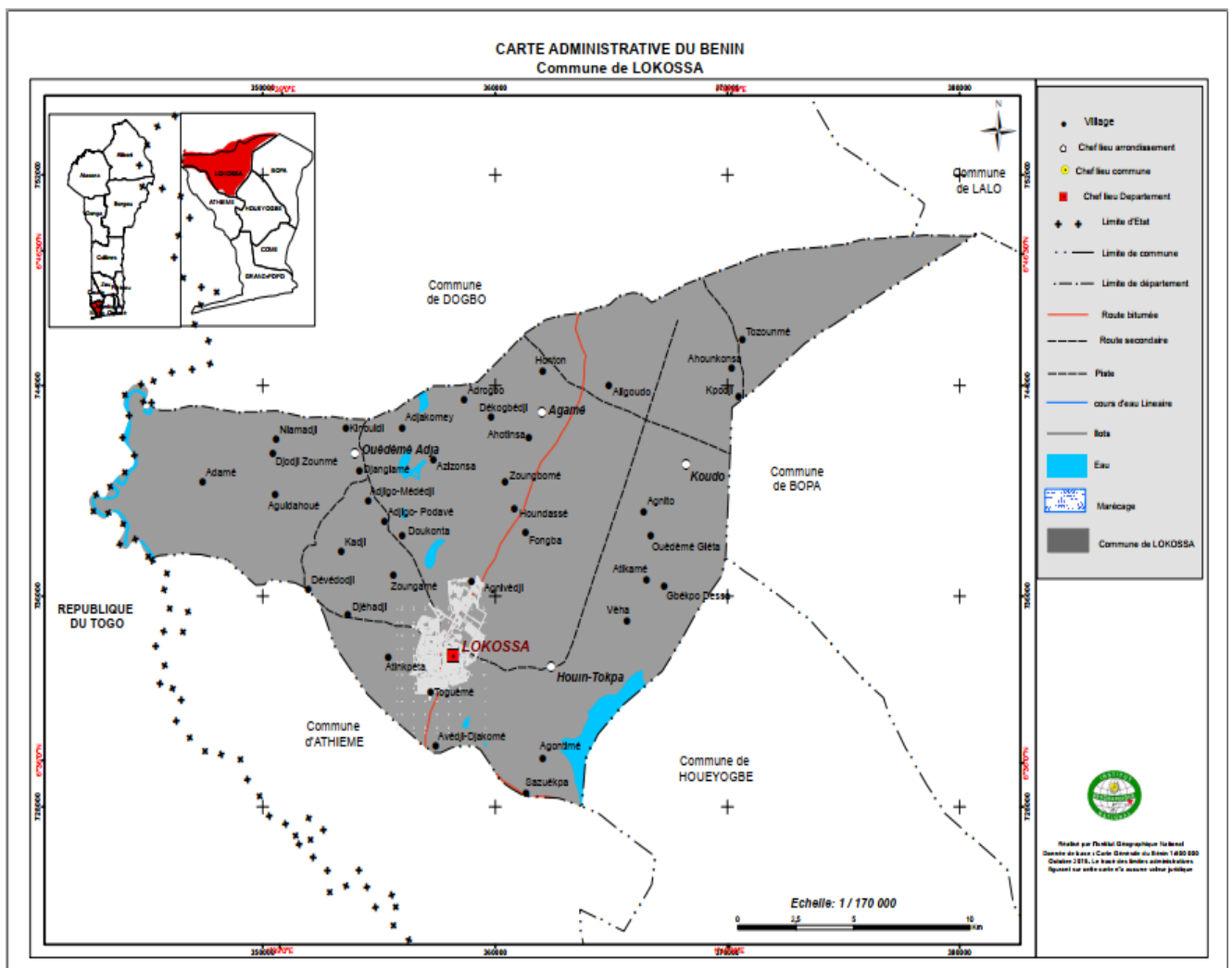


Figure 7 : Situation géographique de la commune de Lokossa

(Source : IGN, 2019)

Chef-lieu du département du Mono, la commune de Lokossa compte cinq (05) arrondissements à savoir : Lokossa, Agamè, Koudo, Houin et Ouèdèmèy-Adja. Elle compte 65 villages et 08 quartiers de ville. Chef-lieu du département du Mono, la commune de Lokossa compte cinq (05) arrondissements à savoir : Lokossa, Agamè, Koudo, Houin et Ouèdèmèy-Adja. Elle compte 65 villages et 08 quartiers de ville.

1.6.2 Climat

La commune de Lokossa, comme les départements du Mono et du Couffo, est caractérisé par un climat subéquatorial marqué par une pluviométrie moyenne variant entre 800 mm et 1200 mm, avec une humidité relative variant entre 55% et 95% et quatre (04) saisons étalées de façon alternée sur toute l'année :

- Une grande saison sèche de novembre à mars
- Une grande saison pluvieuse de mars à juillet
- Une petite saison sèche entre juillet et août
- Une petite saison pluvieuse d'août à novembre
- La température peut atteindre 27,9 °C avec une insolation annuelle moyenne de 2024h/an.

Ce type de climat est appelé « climat semi-aride et favorise le gonflement des sols argileux avec une pluviométrie annuelle moyenne variant entre 850 et 1100 mm

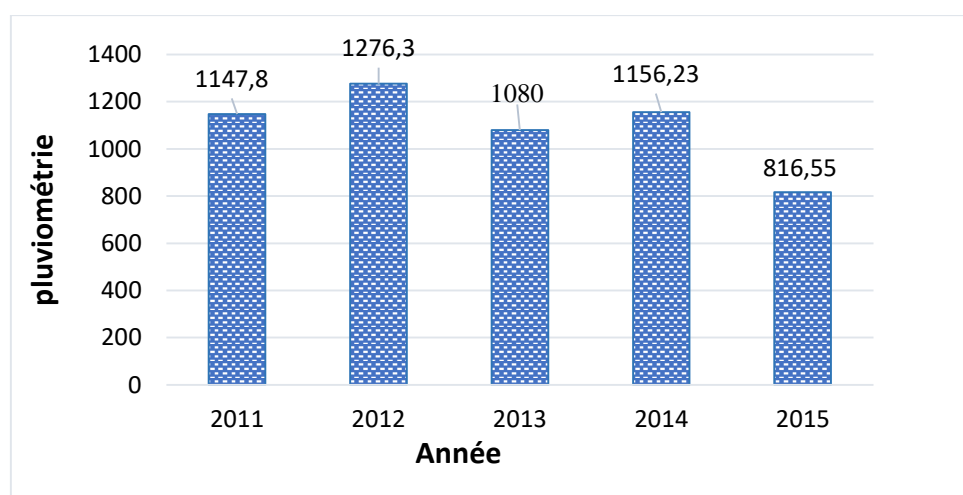


Figure 8 : Évolution de la pluviométrie sur les cinq (05) dernières années dans la commune de Lokossa

(Source : ASECNA, 2016)

1.6.3 Relief

La commune de Lokossa est caractérisée par un relief constitué de plateaux d'argileux de terre de barre dont l'altitude dépasse rarement 200 m.

1.6.4 Sols

Les sols de la commune sont globalement de deux types ferralitiques et hydro morphe qui rendent favorables la variété de cultures.

Du point de vue géologie, la commune possède de basse vallée et de formations alluviales avec des dépressions plus ou moins prononcées, ce qui donne à l'ensemble du relief un aspect bosselé.

1.6.5 Hydrographique

La commune de Lokossa dispose d'un réseau hydrographique un peu dense avec la présence du fleuve Mono, le lac Toho, le lac Djètoè et les lac Doukon, Egbo et Togbadji qui réparties un peu partout sur la carte de la commune lui assure un réseau fluvial lacustre bien garni.

1.6.6 Végétation

La végétation est constituée de savane arbustive, de prairies marécageuses, de palmeraie et des mosaïques de cultures et de jachères.

1.7 Présentation des activités menées au cours du stage

Notre stage a la SNERTP S.A s'est déroulé dans la section route.

La section route est l'une des sections de la SNERTP S.A qui s'occupe des essais spécifiques liés à la construction routière, des bâtiments et ouvrages d'arts. Les essais sont réalisés sur les matériaux granulaires afin de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers.

Nous avons suivi au cours de notre stage, les différents essais géotechniques dans le cadre du projet de réalisation des remblais techniques et le rechargement de la voie OUEDEME-DANSIHOUE sur un linéaire de 2,900 km. L'ensemble des activités menées dans le cadre des études géotechniques dudit projet, concerne essentiellement :

- La réalisation des essais in situ
- La réalisation des essais en laboratoire pour une identification complète des sols

- La recherche de carrière et la réalisation des essais physiques et mécaniques sur les matériaux d'emprunts.

1.7.1 Réalisation des essais in situ

Les essais in situ sont des essais réalisés sur le terrain afin de déterminer les caractéristiques mécaniques ou la lithologie du sol en place. Dans le cas de notre projet, ces essais concernent essentiellement l'essai au pénétromètre dynamique et le sondage à la tarière.

1.7.1.1 Le sondage à la tarière

Le sondage à la tarière est un essai effectué sur le sol en place afin de ressortir sa coupe lithologique.

La lithologie d'un sol est l'étude de la coupe géologique de ce dernier. En technique routière, la norme recommande un sondage sur au moins trois (03) mètres de profondeur. Le sondage à la tarière est fait avec récupération de matériaux en quelques points de la route. Cette étude nous permettra d'avoir la coupe géologique des sols en place sur trois (03) mètres de profondeur. L'essai a été réalisé le long de la piste à de différents points kilométriques.



Photo 3 : Sondage à la tarière manuelle avec récupération de matériaux

1.7.1.2 Sondage au pénétromètre dynamique

L'essai de pénétration dynamique est un essai qui permet de connaître la résistance dynamique du sol en place. Le sondage au pénétromètre dynamique consiste à enfoncer dans le sol, un train de tiges, sous l'action des chocs répétés, exercés sur la tête du train de

tige par une masse (le mouton de battage) tombant en chute libre d'une hauteur constante. On note le nombre de coups nécessaires (N) pour faire pénétrer dans le sol, la pointe d'une hauteur h cm donnée.

Limité à une profondeur de 30 m, l'essai peut être réalisé dans tous les sols fins et les sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 60 mm. Il permet d'apprécier entre autres :

- La succession des différentes couches du terrain
- L'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies
- La position d'une couche résistante dont l'existence et la position de la nappe phréatique.

Cet essai peut servir à orienter le choix des fondations et à évaluer un ordre de grandeur des capacités portantes lorsque l'on dispose d'informations complémentaires.

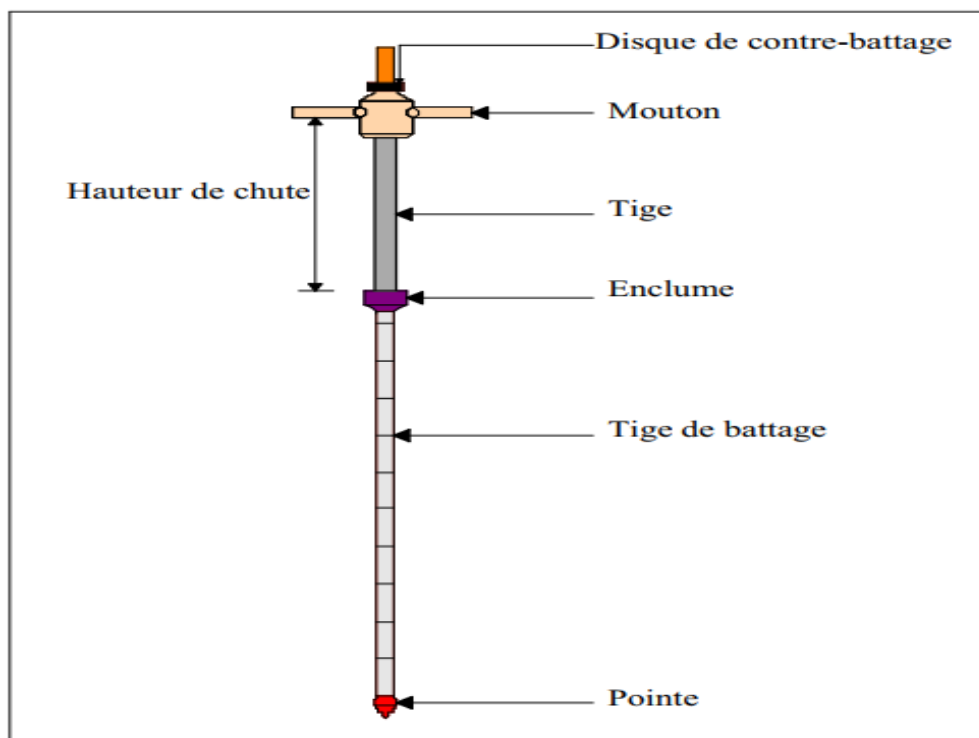


Figure 9 : Pénétromètre dynamique



1.7.2 Réalisation des essais d'identification sur les sols en laboratoire

Pour tout projet routier, les caractéristiques physiques et mécaniques sont importantes pour le dimensionnement des chaussées. Le dimensionnement de la structure de chaussée étant nécessaire pour la phase d'Avant-projet détaillé, il serait nécessaire de déterminer à ce stade, les caractéristiques de la plateforme support de chaussée.

L'identification des matériaux en technique routière, permet de les classer suivant le Guide de Terrassement routier (GTR 62) selon la norme NFP 11-300.

Les essais d'identification physique et mécanique nécessaires sont :

- L'analyse granulométrique par tamisage NFP 94-056
- Les limites d'Atterberg suivant la norme NFP 94-051
- Essai au bleu de méthylène NFP 94-068
- Essai Proctor suivant la norme NFP 94-093
- Essai CBR suivant la norme NFP 94-078.

Ces essais sont réalisés après un prélèvement des matériaux en place sur le tronçon d'étude.

1.7.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1)

1.7.2.1.1 Principe de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer les dimensions des grains selon leurs proportions relatives dans le matériau et d'en tracer la courbe granulométrique ; qui est un graphique semi – logarithmique dont l'ordonnée exprime les pourcentages cumulés des matières passantes et l'abscisse exprime les dimensions des tamis. Le principe consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis à mailles carrées le matériau en plusieurs catégories de grains de dimensions décroissantes et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

1.7.2.1.2 But de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis ou par tamisage manuel. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus

de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. On trace ensuite la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

1.7.2.1.3 Matériels

- Série de tamis normalisés
- Main écope
- Gamelle
- Balance de précision d’une portée de 5 kg et précise à 1g près
- Balance de 30 kg et précise de 10 g près
- Etuves (60 °C à 105 °C)
- Truelle qui servira à rassembler le matériau
- Brosse métallique
- Brosse en laine et pinceau
- Plateaux et récipients
- Couvercle et fond de tamis de même diamètre que les tamis.



Figure 10 : série des tamis normalisés avec l'appareil vibratoire

1.7.2.1.4 Méthode

- **Echantillonnage**



a) étuve ventilée



b) balance de précision + tare

Il sera réalisé conformément aux prescriptions indiquées dans la norme ensuite on aura a procédé comme suit :

- Prélever une quantité suffisante du matériau qu'on mettra à l'étuve pendant 24h
- Sortir le matériau de l'étuve après les 24h puis étaler sur une planche
- Laisser refroidir puis procéder au quartage
- Faire une prise d'essai de l'échantillon de masse M_1 compris en **200D** et **600D** avec **D** diamètre du plus gros élément de l'échantillon (**D** en **mm**)
- Imbiber la masse prise dans une gamelle pendant 24h
- Passer au lavage de l'échantillon au tamis 0.080 mm après les 24h afin d'éliminer les fines dans le matériau. Le lavage est terminé lorsque l'eau de lavage est plus ou moins propre
- Passer au séchage l'étuve pendant 24h à **105 °C ± 5°** jusqu'à poids constant pour **les sols insensibles** à la chaleur et **50 °C** pour **les sols sensibles** à la chaleur.

• **Exécution d'essai :**

Après avoir terminé l'échantillonnage, il faut peser la masse sèche retirer de l'étuve et noter M_2 puis procéder au tamisage comme suit :



- Superposer la série des tamis selon qu'on soit en présence d'un sol ou d'un granula ;
- Faire passer la masse mesurée à travers la colonne de série des tamis normalisés. Cette colonne est constituée d'un certain nombre de tamis emboîtés, et disposés de haut vers le bas, dans un ordre de dimension de mailles décroissant jusqu'au tamis de diamètre minimal, avec le fond et le couvercle ;
- Secouer l'ensemble pour faciliter la répartition de la masse suivant la série des tamis superposés ;
- Pour éviter toute perte et s'assurer d'une bonne répartition, adopter à chaque tamis respectif un bol puis un couvercle et tamiser pour recueillir les passants du tamis, puis mesurer la masse partielle du refus sur tamis ;
- Renverser les particules recueillies dans le bol sur le tamis suivant. Effectuer la même opération décrite pour chaque tamis,
- Après report des masses partielles de refus de la répartition sur série de tamis sur la fiche d'essai, procéder au calcul des masses cumulées de refus ;
- Assurer que la masse cumulée finale des refus correspond à la masse des particules solides après séchage si oui cela prouve il n'y a pas des pertes enregistrées. Dans le cas contraire, la perte calculée doit être inférieure à 1% de la masse des particules solides après séchage.

▪ **Calculs et interprétation des résultats :**

L'opération ainsi terminée Les résultats de cet essai sont traduits en courbe après avoir rempli la fiche de note ou d'essai lors du tamisage et ensuite on aura à calculer pour chaque tamis les pourcentages de refus cumulés par rapport à la masse sèche initiale M_1 , c'est-à-dire la masse avant lavage.

Masse des fines éliminées au lavage (M_3)

$$M_3 = M_1 - M_2$$

-Pourcentage des refus cumulé sur chaque tamis ($\%R_{cu}$) :

$$\%R_{cu} = \frac{\text{Masse des refus cumulés sur le tamis}}{M_1} \times 100$$

-Pourcentage des passants traversant chaque tamis ($\%P$) :

$$\%P = 100 - \%R_{cu}$$



Avec M_1 la masse sèche avant lavage.

Ces calculs terminés tracer ensuite à partir du pourcentage des passants de chaque tamis et leur diamètre respectif, la courbe granulométrique par tamisage. Une fois tracé on peut faire l'interprétation des résultats. Comme interprétation on n'a :

- **Coefficient d'uniformité C_u**

Encore appelé coefficient de HAZEN, il renseigne sur l'étalement du matériau sur les tamis. Plus il est élevé, plus il y a de tamis. On notera :

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

Avec :

D_{60} : Le diamètre du tamis pour lequel il y a 60% de passant

D_{10} : Le diamètre du tamis pour lequel il y a 10% de passant.

D'après certains auteurs (**caquot et Kérisel**) la granulométrie est dite :

- Uniforme pour $C_u < 2$

- Variée ou étalée pour $C_u > 2$.

- **Coefficient de courbure (C_c)**

Il renseigne sur l'allure de la courbure et est déterminé par l'expression suivante :

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

Avec :

D_{30} : le diamètre du tamis pour lequel il y a 30% de passant.

La valeur du coefficient de courbure C_c , qualifie la graduation du sol comme suit :

- $1 < C_c < 3$, le sol est bien gradué

- Dans le cas contraire il est mal gradué.

- **Module de finesse (M_f) NF P18-540**

Le module de finesse du sable est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{des refus cumulés en \% des tamis (0,160-0,315-0,63-1,25-2,5-5)}$$

Avec diamètre des tamis en (**mm**).

Si $M_f < 2,2$ on dira que le sable est fin

Si $M_f > 2,8$ on dira que le sable est grossier

Pour un bon sable entrant dans la confession du béton le module de finesse doit respecter la condition suivante :

$$2,2 < M_f < 2,8$$

1.7.2.2 Analyse granulométrique par sédimentometrie (NP P94-057)

L'analyse granulométrique par sédimentometrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 microns.

1.7.2.2.1 Principe

La sédimentation consiste à mesurer la densité d'une suspension (particules solides immergées dans l'eau) en fonction de la vitesse de décantation des particules. Le principe est basé sur la loi de Stokes qui exprime à partir de l'équilibre, la relation entre la vitesse de décantation (supposée constante) et le diamètre d'une particule supposée sphérique.

L'échantillon est tamisé par voie humide au tamis de 80 μm . L'eau de lavage est recueillie dans un bac puis mise à décanter. L'eau claire est ensuite siphonnée. Le reliquat d'eau est éliminé par étuvage. Le matériau sec est désagrégué dans un mortier au moyen d'un pilon puis mis en solution avec de **l'hexa méta phosphate de sodium** pour provoquer la défloculation des agrégats formés par l'étuvage. Le mélange est ensuite agité puis déversé dans une éprouvette de 2 litres. On lit périodiquement les masses volumiques au moyen d'un densimètre.

Le densimètre plongé dans l'éprouvette d'essai mesure à une profondeur déterminée et à un instant **t** après le début de la décantation, la densité variable **dt** de la suspension initialement uniforme. Cette densité indique la concentration en particule ayant un diamètre inférieur ou égale à la dimension D.

1.7.2.2.2 But de l'essai

La sédimentation consiste à laisser sédimenter les éléments de diamètre inférieurs à 0.080 mm dans un liquide et à mesurer la proportion de grains de grosseur définie qui se dépose

à un instant t donné. Autrement dit, elle aide à déterminer la distribution en poids des particules d'un sol dont la plus grande dimension est égale à 80 microns. Pour un sol intermédiaire, elle complète l'analyse granulométrique par tamisage et permet de retrouver la courbe granulométrique complète.

1.7.2.2.3 Matériels

- Deux éprouvettes en verre de 1 ou 2 litres
- Un densimètre
- Un thermomètre
- Un chronomètre
- Un agitateur électrique
- Un produit chimique, le dé flocculant (hexa méta phosphate de sodium)
- Un tamis de lavage (0.080 mm).



Photo 4 : Appareillages pour réalisation de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

1.7.2.2.4 Mode opératoire :

Il se fera en deux étapes à savoir préparation de l'échantillon et ensuite de l'exécution de l'essai



L'échantillon de sol est obtenu après tamisage par voie humide à travers le tamis d'ouverture de maille 0.080 mm puis on procède au séchage du tamisât à l'étuve à la température $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$

- Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance
- Prendre 60 cm³ de dé flocculant et ajouter 440 cm³ d'eau distillée pour obtenir une solution de 500 cm³
- Diviser la solution obtenue (500 cm³) entre les deux éprouvettes à raison de 250 cm³ chacune
- Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre
Cette éprouvette sera appelée dorénavant l'éprouvette B (l'autre éprouvette sera nommée l'éprouvette A)
- Prendre 20 g de sol
- Verser ces 20 g dans le récipient de l'agitateur mécanique et verser dessus une certaine quantité de la solution de l'éprouvette A
- Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 3 min
- Verser la suspension dans l'éprouvette A (bien rincer le récipient et les ailettes pour ne pas perdre le matériau)
- Compléter l'éprouvette A avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre
- Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel
- Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (On les appellera **R_i**). Les temps de lecture sont : 30'' ; 1 min ; 2 min ; 5 min ; 10 min ; 30 min ; 60 min.

NB :

- Pour les 5 premières lectures, le densimètre n'est pas retiré de la suspension
- Après la 5^{ème} lecture, une fois celle-ci effectuée, et ça sera le cas pour le reste des lectures, le densimètre est retiré de la suspension, nettoyer et ranger soigneusement
- Pour reprendre les lectures et à chaque fois, le densimètre est introduit dans la suspension environ 30 s avant la lecture
- A la fin des lectures, le densimètre est retiré de l'éprouvette A, introduit dans l'éprouvette **B**
- Procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette **B** (On l'appellera **RB**)

- Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement
- A l'aide du thermomètre, procéder à la lecture de la température de la solution de l'éprouvette B.

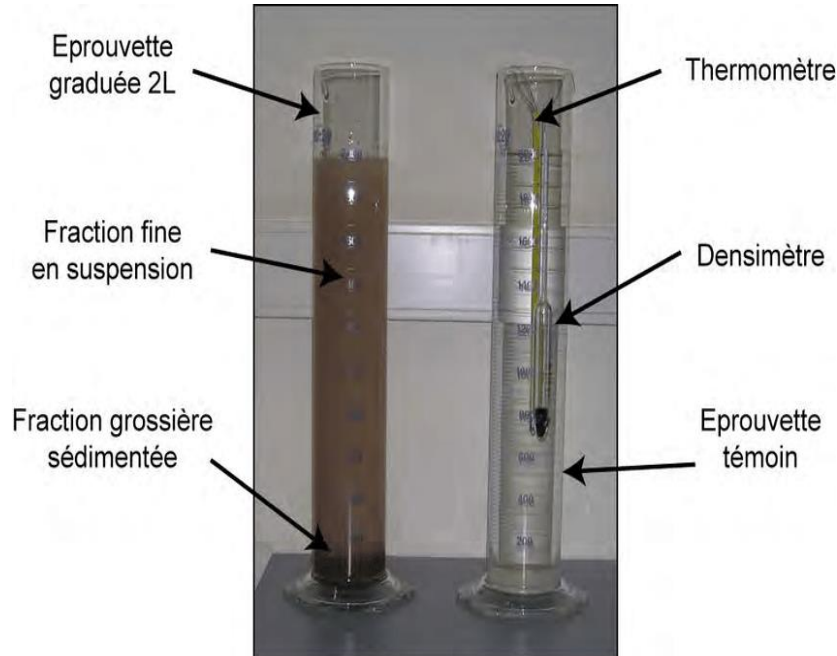


Photo 5 : Essai en cours dans les deux éprouvettes

1.7.2.2.5 Calculs et interprétation des résultats

Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute est directement liée à leur diamètre (**loi de Stokes**). Cette relation s'écrit :

$$V = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot g}{18\mu} D^2$$

Avec :

V : est la vitesse de chute ou de décantation des particules en cm/s

γ_s : est la masse volumique des particules solides en g/cm³

γ_w : est la masse volumique du liquide (l'eau) en g/cm³

g : désigne l'accélération de la pesanteur en cm/s²

D : est le diamètre de la particule en cm

μ : désigne la viscosité du liquide en poise (Po)



- Calcul du diamètre des particules non décantées (D)

Le diamètre des particules est tiré de la relation de Stokes :

$$D = K\sqrt{V}$$

Avec : $K = \sqrt{\frac{18\mu}{\gamma_s - \gamma_w}}$ et $V = \frac{H_r}{t}$

$$D = \sqrt{\frac{18\mu \cdot t}{g(\gamma_s - \gamma_w)H_r}}$$

Avec :

H_r : La profondeur du centre de poussée dans la suspension à l'instant t

t : Le temps de lecture

- Calcul de la profondeur du centre de poussée (H_r)

$$H_r = H - 100 \cdot H_1 (R - R_t) - H_c$$

Avec :

- H_r : Hauteur séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 ($H = 22,2$ cm)
- H_1 : La distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ($H_1 = 3,8$ cm)
- R : La lecture du densimètre (sommet du ménisque) à l'instant t
- R_t : la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin
- H_c : La hauteur de déplacement de la solution due au densimètre
- $H_c = 0$ pour les trois premières lectures
- $H_c = 0,5 \cdot \frac{V_d}{A}$ (V_d : volume du densimètre et A : l'aire de la section droite de l'éprouvette).

Corrections

Les lectures effectuées sur le densimètre doivent intégrer un certain nombre de corrections due peut-être certaines perturbations lors de la réalisation de l'essai.

Aux nombres de ces corrections nous avons :

- La correction due aux variations de la température (C_t)
- La correction due à la hauteur du ménisque (C_m)
- La correction due au dé flocculant (C_d).



La lecture corrigée prend en compte l'ensemble de ces corrections et on n'a :

$$R_c = R + C_{or} \text{ avec } C_{or} = C_t + C_m + C_d$$

Remarque : Le diamètre D déterminé par la loi de Stokes est un diamètre de particule sphérique. Les grains ayant à priori une forme quelconque, le diamètre calculé est dit équivalent.

- Pourcentage des particules non sédimentées

Notons « P » le pourcentage des grains de diamètre inférieur à « D » qui sont encore en suspension à l'instant t.

$$P = \frac{V' \cdot \gamma_s \cdot \gamma_w}{m \cdot \gamma_s - R_t \cdot \gamma_w} \cdot (R_c - R_t)$$

Avec :

V' : Volume de la suspension

M : Masse de la prise d'essai

R_c : La lecture corrigée du densimètre à l'instant t

R_t : La lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin à l'instant t.

1.7.2.3 Essai de teneur en eau (NF P 94-050)

L'essai de teneur en eau est un essai de laboratoire permettant de déterminer la quantité d'eau présente dans un matériau, exprimée en pourcentage par rapport à la masse sèche du matériau. Cet essai normalisé suivant la norme NF P94-05 et est indispensable pour le contrôle de la bonne teneur en eau lors de la mise en œuvre des matériaux traités aux liants hydrauliques (graves-ciment, sols traités, etc.), paramètre influençant grandement leur ouvrabilité et leurs performances mécaniques finales.

1.7.2.3.1 But de l'essai

Cet essai permet de déterminer la proportion d'eau contenue dans un sol ou dans un échantillon de ce sol.

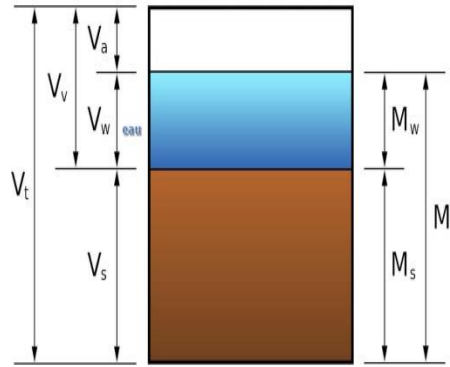


Figure 11 : composition d'un sol

1.7.2.3.2 Matériels

- Des récipients
- Une étuve pouvant atteindre une température de 105 °C
- Une balance électronique de précision 1 g
- Des tares.

▪ Mode opératoire :

- Prélever un échantillon représentatif du matériau par quartage
- 50 g à 100 g pour des sols fins
- 100 g à 500 g pour des sables
- 100 g à 1 kg pour des graviers
- Peser la masse du matériau à l'état humide : M_h
- Mettre l'échantillon à l'étuve à 105 °C pendant 24h ou au four à micro-ondes
- Retirer le matériau de l'étuve après les 24h
- Peser l'échantillon sec : M_s

▪ Calculs

L'opération ainsi terminer la teneur en eau est donné par la formule suivante :

$$W\% = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

1.7.2.4 Essai de densité apparente (NF EN 1097-3)

La masse volumique apparente ou densité apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et

imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

1.7.2.4.1 But de l'essai

Cet essai consiste à faire le rapport entre la masse de l'échantillon et le volume qu'il occupe.

1.7.2.4.2 Matériels

- Un récipient de volume connu
- Une balance de précision
- Une règle à raser
- Une main écope
- Un pinceau.

1.7.2.4.3 Mode opératoire

- Peser les conteneurs vides, secs et propres (m1)
- Poser le conteneur sur une surface horizontale et le remplir à l'aide de la pelle jusqu'à ce qu'il déborde. Durant le remplissage du conteneur, limiter la ségrégation en appuyant sur le bord supérieur. A aucun moment, le bord de la pelle ne doit être à plus de 50 mm au-dessus du conteneur
- Enlever avec soin tout excédent au sommet du conteneur en veillant à ce que la surface soit étalée de manière uniforme afin d'éviter tout phénomène de ségrégation
- Niveler la surface des granulats à l'aide de la règle, en ayant soin d'éviter tout compactage à la surface. Si cela s'avère impossible, niveler la surface à la main en essayant autant que possible d'estimer le volume des granulats par rapport à la capacité du conteneur
- peser le conteneur rempli et enregistrer sa masse à 0,1 % près (m2)
- Soumettre trois prises d'essai à cet essai.

1.7.2.4.4 Résultats

L'opération ainsi terminée, l'expression de la densité apparente est :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

1.7.2.5 Essai des limites d'ATTEMBERG (NF P94-051)

1.7.2.5.1 Définition

Les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) sont les teneurs en eau pondérales correspondantes à des états particuliers d'un sol (voir Figure ci-dessous). Ce sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité : w_L)
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité : w_P)

L'indice de plasticité (IP) est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité.

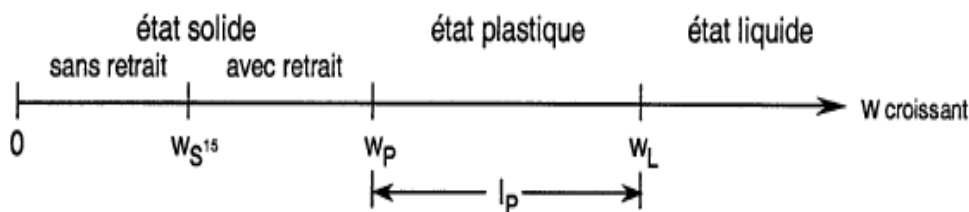


Figure 12 : Les différents états d'un sol

Dans les sols en place, la teneur en eau naturelle W_{nat} est généralement comprise entre W_s et W_p , très près de W_p .

1.7.2.5.2 Méthode de Casagrande et méthode du rouleau

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande. L'essai consiste à déterminer de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans le sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées, se ferme d'un centimètre, lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés (voir Figure). Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture sur un centimètre pour 25 chocs.

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau. Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau pour laquelle, un rouleau de sol de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure en 2 ou 3 morceaux au moment où son diamètre atteint 3 mm

1.7.2.5.3 Matériels

- Appareil de CASAGRANDE muni de l'outil à rainurer
- Balance de 5 kg (précision 1 g)
- Étuve ventilée
- Des tares ou récipients métalliques ou boîtes de pétri ou capsules de verre
- Une plaque de verre ou de marbre
- Des chiffons
- Une pissette d'eau
- Spatules à langue de chat
- Spatule à bout large
- Mortier et pilon en porcelaine.



Photo 6 : Appareillage pour l'essai de limite d'ATTEMBERG



Photo 7: Coupelle rempli de matériau

1.7.2.5.4 Résultats et interprétation

- **L'indice de plasticité :**

Elle est obtenue par la différence de la **limite de liquidité** et de **plasticité**.

$$I_p = W_L - W_p$$

Tableau 2 : Degré de plasticité des sols en fonction de l'indice de plasticité

Degré de plasticité	Indice de plasticité
0	Non Plastique
Très faiblement Plastique	[1-5 [
Faiblement Plastique	[5-10[
Moyennement Plastique	[10-20[
Plastique	[20-40[
Très Plastique	[40 - ∞[

- **L'indice de consistance**

Elle est déterminée par la différence de la **limite de liquidité** et la **teneur en eau du sol dans son état naturel** sur l'**indice de plasticité**.

$$I_c = \frac{W_L - W_{nat}}{I_p}$$

D'après les valeurs de l'indice de consistance :

Si $I_c > 1$, le sol est à l'état solide

Si $0 < I_c < 1$, le sol est à l'état plastique

Si $I_c < 0$, le sol est à l'état liquide.

1.7.2.6 Valeur au Bleu du Sol (NF P94-068)

Également appelé « essai au bleu », c'est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée

1.7.2.6.1 But de l'essai

L'essai a pour objectif d'évaluer la propreté d'un sol et son niveau d'argilosité. On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout ; en effectuant une tache sur un papier filtre

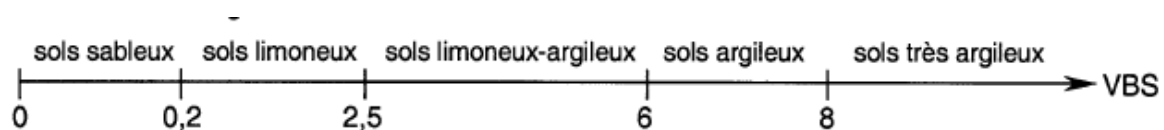


Figure 13 : Ordre de grandeur du VBS

Source : Géotechnique 1-J. Lérau

▪ Appareillage :

- Balance de précision
- Chronomètre
- Un tamis de 5 mm de diamètre



- Pissette de 500 ml
- Bécher
- Spatule
- Une burette de capacité 100 ml et de graduation 1 /10 ml ou de capacité 60 ml et de graduations 1/10 ml
- Papier filtre
- Une baguette de verre
- Un malaxeur avec agitateur à ailettes
- Solution de bleu de méthylène
- Eau distillé.



Photo 8 : Appareillage pour l'essai de VBS

▪ Mode opératoire :

Cet essai s'effectue sur la fraction granulométrique 0/5 mm.

- On prépare un échantillon de 200 g de matériau passé à l'étuve au préalable
- Diviser l'échantillon en trois parties approximativement égales
- Peser chaque partie (numérotées de 1 à 3) à l'aide d'une balance et relever les poids.

NB : Une seule partie est nécessaire mais les deux autres sont préparées en cas de prévisions ou d'échec du 1er essai.



- Mettre l'échantillon de masse M_1 préparé dans le bécher du malaxeur et on ajoute 500 ml d'eau distillé
- Descendre l'agitateur dans le bécher (à noter que l'agitateur du malaxeur doit être à 10 mm loin du fond du bécher afin de garantir un bon malaxage)
- Verser dans la burette propre, la solution de bleu de méthylène. Bien fermer le robinet de la burette et la mettre bien en place au-dessus du bécher du malaxeur
- Mentionner sur le papier filtre le poids de l'échantillon dans le bécher
- Régler alors la vitesse de rotation à 600 tr/min pendant au moins 5 min puis démarrer le malaxeur et enclencher immédiatement après le chronomètre
- Après 5 min, passer à une vitesse permanente de 400 tr/min
- Par la suite ouvrir le robinet de la burette et laisser couler 5 ml du bleu de méthylène au mélange
- Au bout d'une minute on prélève une goutte à l'aide d'une tige en verre et on la dépose sur le papier filtre. Le test est dit positif si la tache entourant l'auréole prend une couleur bleu clair et on procède par la suite à des prélèvements d'une minute d'écart pendant 5 min pour enlever l'incertitude (au cas où l'auréole devient bleu clair à la 5e minute on passe à des injections de 2 ml vu qu'on frôle la saturation). Inversement, le test est négatif si l'auréole est pratiquement incolore ; ainsi on continue d'ajouter 5 ml du colorant jusqu'à les oreillettes sur la tache soient bien visibles.
- Noter le volume total V de solution de bleu ajoutée.

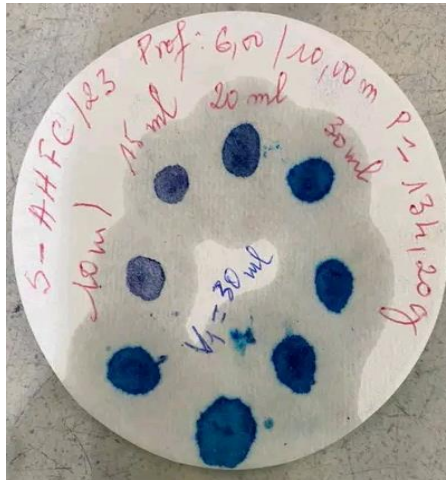


Photo 9 : Papier filtre tacheté

▪ Calculs :

Convertir le volume V en masse M_2 : la solution étant dosée à 10 g /l, on aura :

$$M_2 = V \times 0.01$$

$$VBS = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

M_2 : Masse de solution ajoutée.

▪ Interprétation :

- **VBS = 0,1** sol insensible à l'eau
- **VBS = 0,2** apparition de la sensibilité à l'eau
- **VBS = 1,5** seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux
- **VBS = 2,5** seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
- **VBS = 6** seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- **VBS = 8** seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

1.7.2.7 Essai Proctor

L'essai CBR sert à caractériser la portance du matériau (c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre), mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le matériau

étudié d'une part et dans un matériau de référence d'autre part. Avant l'essai CBR, il est nécessaire de réaliser l'essai Proctor afin de déterminer les caractéristiques de compactage du matériau.



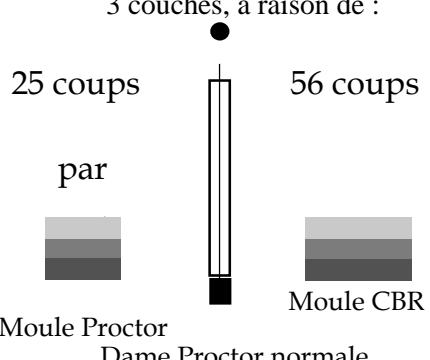
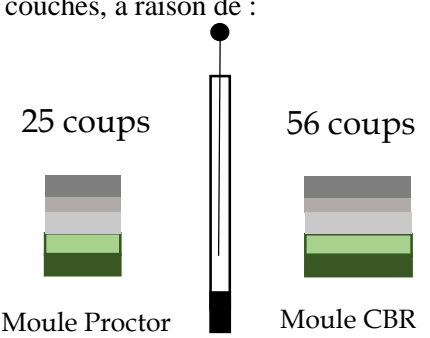
Photo 10 : Prélèvement de matériaux pour les essais d'identification

Le Proctor comme nous appelons bien en laboratoire que sur le chantier est un essai de compactage. L'essai est mis au point par l'ingénieur Américain Ralph Roscoe Proctor en 1933, pendant la période des grands progrès scientifique.

Au paravent les matériaux de remblai étaient compactés par des chevaux à travers les parts tenant compte de la direction (aujourd'hui : **les passes**).

C'est un essai permettant de simuler l'évolution du sol au cours du compactage pour une énergie de compactage donnée, et de déterminer la teneur en eau optimale permettant d'obtenir la densité sèche maximale. Il existe deux variantes de l'essai Proctor :

Tableau 3 : modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule A	Moule B	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame Diamètre du mouton Hauteur de chute Nombres de couche Nombres de coup par couche	2500g 50mm 305mm 3 25	2500g 50mm 305mm 3 56	3 couches, a raison de : 
Essai Proctor modifié	Masse de la dame Diamètre du mouton Hauteur de chute Nombres de couche Nombres de coup par couche	4500g 50mm 457mm 5 25	4500g 50mm 457mm 5 56	5 couches, a raison de : 

1.7.2.7.1 But de l'essai

L'essai permet de déterminer les références de compactage (**teneur en eau optimale et la densité sèche maximale**) d'un matériau. L'essai Proctor consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau (2% ,4%,6%,8%,10%...) et à la compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle dans un moule et avec une dame donnée.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe de variation de cette masse en fonction de la teneur en eau. Cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. L'essai s'effectue que sur les matériaux ne contenant que des éléments inférieurs à 20 mm.

1.7.2.7.2 Appareillage

- Moule Proctor et une dame Proctor en fonction du type de Proctor à réaliser
- Cinq séries de récipients pouvant contenir chacune la masse de l'échantillon à traiter

- Une auge qui servira au malaxage du matériau
- Une éprouvette graduée
- Une truelle pour le malaxage du matériau
- Une main écope pour servir le matériau dans le moule
- Un tamis de diamètre 20 mm ou 5 mm selon l'essai Proctor dont il est question
- Une étuve pour le séchage du matériau à poids constant
- Deux balances
- Socle de compactage
- Huile de démoulage
- Une règle métallique pour araser
- Marteau, burin, pinceau.



Photo 11 : Moule et dame Proctor normal et modifiée

Source : Proviteq.com

1.7.2.7.3 Mode opératoire

- **Préparation de l'échantillon**

- Mettre l'échantillon à l'étuve pendant 24h
- Prélever 500 g de l'échantillon et déterminer la teneur en eau initiale w_i
- Etaler le reste du matériau sur une grande plaque pour aérer ; cribler avec un tamis convenable selon le Proctor ; puis faire un quartage
- Prélever 5 échantillons de même masse selon le Proctor (**Normal : 3000 g, Modifié : 6000 g**).



Photo 12 : Étapes de préparation de l'échantillon

- **Compactage :**

- Assembler l'ensemble moule + embase + disque d'espacement (s'il s'agit du moule CBR) + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis peser l'ensemble P1 et adapter la rehausse
- Verser le 1er échantillon dans l'auge et ajouter une quantité d'eau bien définie. La quantité d'eau de mouillage de départ se fixe par appréciation de l'opérateur et de son expérience (généralement 8% ou 10%)
- Malaxer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit homogène
- Diviser l'échantillon en nombres de couches selon le portor sensiblement égales et mettre un tas d'échantillon dans le moule
- Damer sur toute la surface de cette première couche d'un nombre de coup connu selon le Proctor. Cette opération est répétée soigneusement sur les autres couches
- Après avoir compacté le matériau dans le moule, enlever la hausse puis araser la surface
- Peser l'ensemble échantillon + moule avec embase
- Prélever 500 g de cet échantillon et déterminer la teneur en eau
- L'opération est répétée pour différentes teneurs en eau (le pourcentage d'eau de mouillage augmente de préférence de 2%) jusqu'à ce que la masse du moule + échantillon humide chute
- Déterminer pour chacun des échantillons restants les teneurs en eau

L'essai prend fin lorsque la masse d'échantillon compacté chute ; cela prouve que l'optimum Proctor a été atteint.

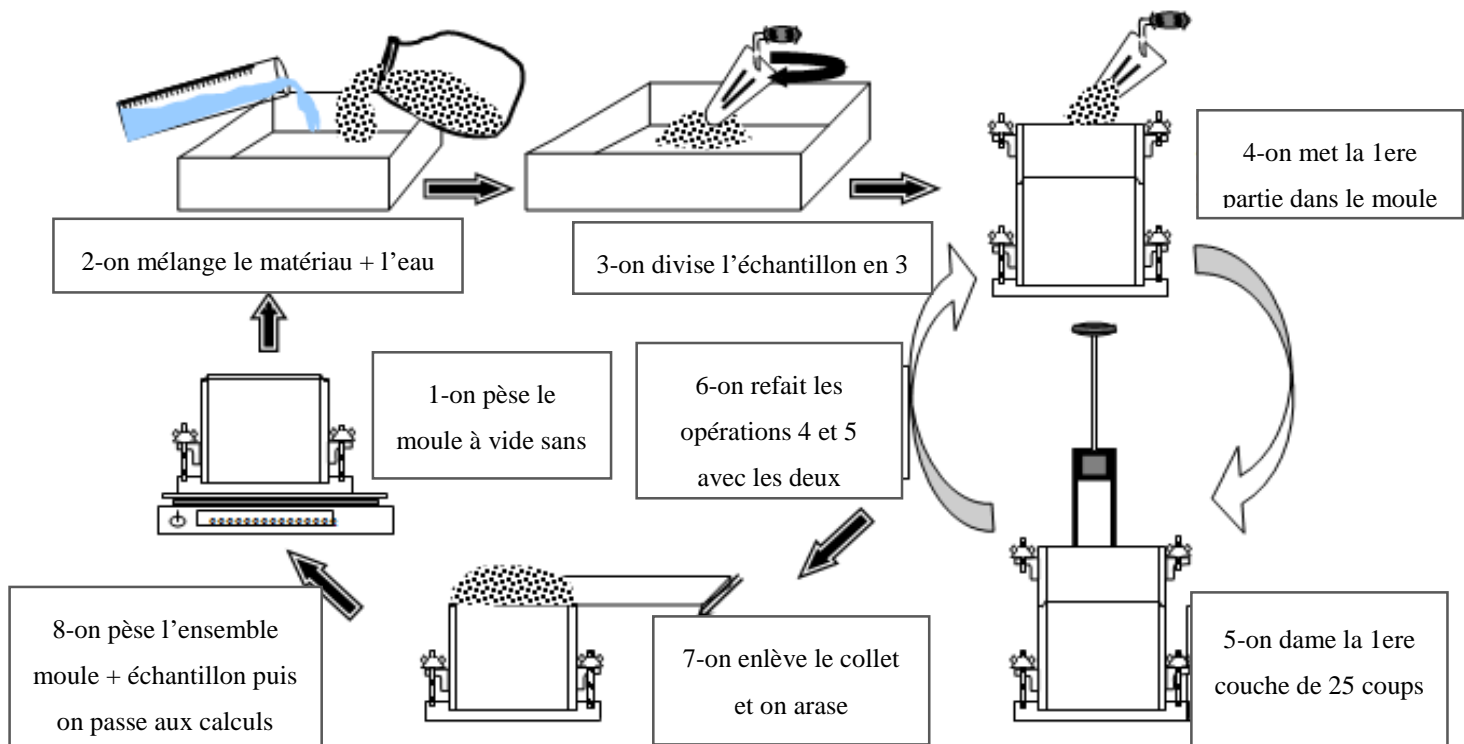


Figure 14 : Schéma récapitulatif de l'essai Proctor normal

Source : civilmania.com

▪ Calculs :

Les paramètres recherchés lors de la réalisation de l'essai Proctor sont : la teneur en eau, la densité humide, la densité sèche

-Teneur en eau (w) :

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

Avec :

M_h : Masse humide en (g)

M_s : Masse sèche en (g)

W : Teneur en eau (%).

-Densité humide (D_h) :

$$D_h = \frac{M_{he}}{V}$$



Avec :

M_{he} : Masse humide de l'échantillon (g)

V : Volume du moule en (cm³)

D_h : Densité humide en (g/cm³).

-Densité sèche (D_s) :

$$D_s = \frac{100 \cdot D_h}{100 + w}$$

Avec :

D_s : Densité sèche en (g/cm³)

W : Teneur en eau en (%).

1.7.2.8 Essai CBR (Californian Bearing Ratio) (NF P94-078)

L'essai CBR permet de déterminer la portance du sol compacté en couche de chaussé. C'est-à-dire sa résistance à la rupture en estimant sa résistance au poinçonnement en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Il mesure aussi la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant 4 jours. Cet essai est toujours précédé de l'essai Proctor.

Il existe deux types d'essai CBR :

- **Essai CBR immédiat** : mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'optimum PROCTOR
- **Essai CBR après immersion** : mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé pendant plusieurs jours (4 jours en général). Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol à résister sous charge en couche de chaussée et ou soumis à des conditions de variations de régimes hydrique.

De manière générale, la valeur de l'indice CBR diminue avec l'augmentation de la teneur en eau.



1.7.2.8.1 But de l'essai

Il permet la détermination de la capacité portante d'un sol à résister sous charge en couche de chaussée, il s'agit en fait de comparer la portance du sol que l'on est en train de tester à la portance d'un sol standard.

1.7.2.8.2 Matériels

- Trois (03) moules CBR
- Disques d'espacement
- Une (01) dame Proctor modifié
- Des disques de surcharge annulaire en plomb
- Un comparateur pour mesurer le gonflement
- Un disque plat perforé muni en son centre d'une tige à touche réglable
- Une presse hydraulique de 60 kN
- Pelle à main, truelles, brosse métalliques, pinceau
- Une balance de portée maximale de 30 kg précise à 5 g
- Eprouvettes graduées pour la mesure de la quantité d'eau d'humidification
- Une balance de précision d'une portée maximale de 2 kg précise à 0,01 g
- Une étuve ventilée réglable
- Des papiers buvard
- Couteau maillet, burin, marteau, plane à araser
- Un chronomètre
- Gamelle, auge, main écope...etc.

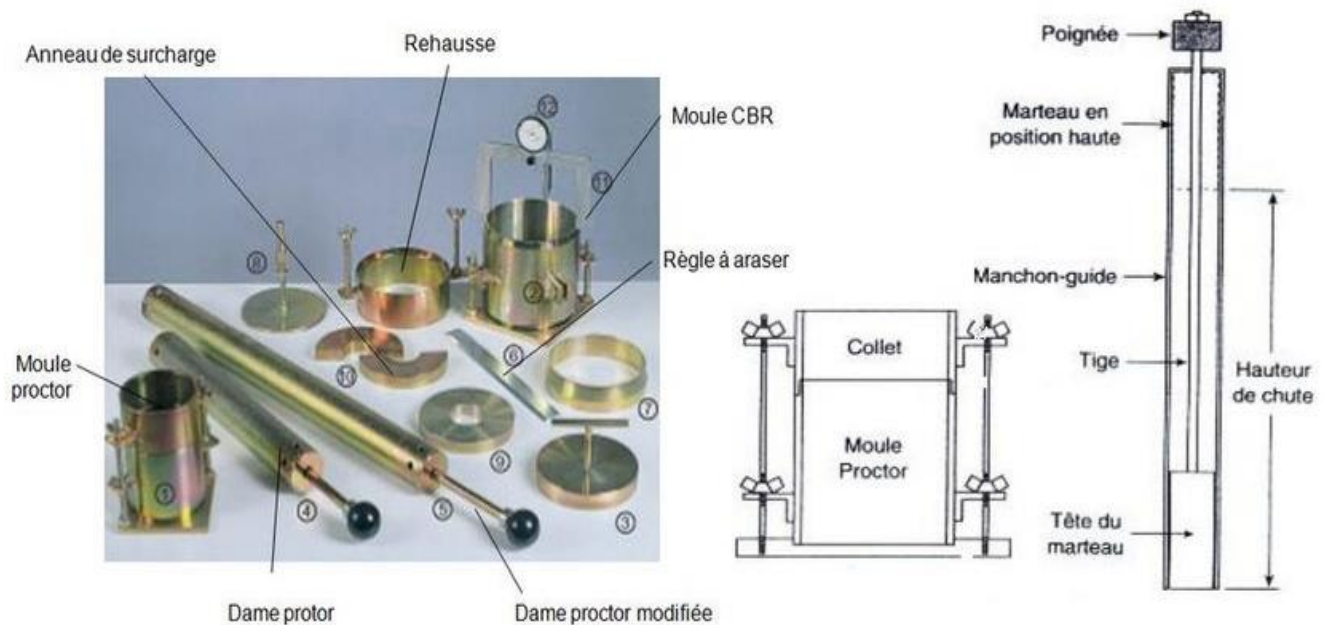


Figure 15 : Matériels CBR:

Source : Proviteq.com

1.7.2.8.3 Mode opératoire

L'essai sera réalisé à la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor. De ce fait il conviendra de préparer le matériau de la même manière que pour l'essai Proctor à savoir :

- Mettre le matériau à l'étuve pendant 24h à une température de 105 °C
- Déterminer sa teneur en eau initiale à une masse de l'échantillon égale à 500 g
- Cribler le matériau au tamis 5 mm ou 20 mm après étuvage
- Faire le quartage et prélever 18000 g du matériau dans une gamelle
- Humidifier le matériau à sa teneur en eau optimal en tenant compte de la teneur en eau initiale

$$E_m = 1800 \times \frac{\text{Teneur en eau optimale}}{100}$$

Avec : E_m l'eau de mouillage en (ml)

- Malaxer le matériau jusqu'à l'homogénéité
- Couvrir le matériau pour éviter l'évaporation de l'eau déjà ajoutée
- Monter les trois moules CBR avec un papier buvard en prenant soin d'inscrire le nombre de coup sur le papier 56, 25 ou 10

- Exécuter ensuite les coups suivant 5 couches
- Enlever la rehausse du moule CBR et araser avec la règle métallique de la moule puis peser le tout sur la balance avec son embase
- Immerger la série de matériau pendant 96h après avoir utilisé le comparateur pour faire une lecture initiale et poser les pistons dessus.



Photo 13 : Immersion des moules CBR

1.7.2.8.4 Poinçonnement

- Mesurer le gonflement sur le moule de 10 coups dans l'eau après les quatre jours avant de commencer le poinçonnement
- Sortir le moule de 56 coups de l'eau d'abord et laisser goutter pendant 15 min puis démarrer le poinçonnement
- Placer le moule sur le plateau de la presse et centrée de telle manière que le piston de poinçonnement soit bien dans le prolongement de l'axe du moule
- Placer le moule sur le plateau de la presse et centrer de manière à ce que le piston de la presse CBR soit bien dans le prolongement de l'axe du moule
- Initialiser c'est à dire mettre à zéro les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements
- Remettre les surcharges annulaires



- Manœuvrant lentement le volant de la presse jusqu'au moment où l'aiguille du comparateur de l'anneau dynamométrie commence à bouger. A ce moment le piston est bien en contact avec la surface de l'échantillon
- Fixer le cadence-mètre sur le bord du moule le mettre à zéro et le mettre en marche
- Dès qu'on commence le poinçonnement pour le moule de 56 coups on sort en même temps le suivant 25 coups le temps qu'il goutte
- L'opérateur se met alors au volant de la presse et commence le poinçonnement au moment où le rayon repère de l'indicateur de cadence viennent se superposer à l'aiguille du comparateur, il manœuvre lentement le volant de façon à maintenir en coïncidence l'aiguille du comparateur et le rayon repère. En procédant de cette façon de poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27 mm / minute)
- Noter les forces **F** appliquées par le piston cylindrique aux différents enfoncements de **0,625 mm ; 1,27 mm ; 2 mm ; 2,57 mm ; 5 mm ; 7,5 mm ; et 10 mm**
- Prélever avec une main-écope une quantité de ce matériau. Calculer sa teneur en eau.



Photo 14 : Les étapes de poinçonnement

1.7.2.8.5 Calculs et interprétations

Comme l'essai Proctor, on déterminera la teneur en eau, la densité humide et la densité sèche du matériau en plus de ces déterminations, On détermine des indices portants californiens et le gonflement linéaire.

Indice de portance à 2.5 mm :

$$I_p(2.5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement}}{13.35} \times 100$$

-Indice de portance à 5 mm :

$$Ip(5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement}}{19.93} \times 100$$

-Indice de portance recherchée :

$$Ip = \text{Max}[Ip(2.5); Ip(5)]$$

- Effort de pénétration en (KN)
- Les valeurs **13.5** et **19.93** sont en (KN).

NB : les valeurs **13.5** et **19.93** représentent les forces provoquant l'enfoncement du piston à 2.5mm et 5mm sur le matériau conventionnel de référence.

Tableau 4 : Portance en fonction de l'indice CBR

INDICE CBR	PORTANCE
$I_{CBR} < 5$	Mauvaise
$5 \leq I_{CBR} \leq 10$	Moyenne
$I_{CBR} > 10$	Bonne

-Le gonflement :

$$G = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

Avec :

Δh : Le gonflement linéaire étant la différence de la lecture du comparateur entre le début et la fin de l'imbibition (mm).

h : hauteur initiale de l'éprouvette.

Tableau 5 : Classification des sols en fonction de leur portance

P	Examen visuel (essieu 13t)	Indice portant CBR	Module de déformation à la plaque EV2 (MPa)
P0	Circulation impossible, sol inapte, très déformable	$CBR \leq 3$	$EV2 \leq 15$
P1	Ornières derrières l'essieu de 13t, déformable	$3 \leq CBR \leq 6$	$15 \leq EV2 \leq 20$
P2 ou PF1	Pas d'ornière, peu déformable	Déformable	$20 \leq EV2 \leq 50$
P3 ou PF2		Peu déformable	$50 \leq EV2 \leq 120$
P4 ou PF3		Très peu déformable	$120 \leq EV2 \leq 200$
P5 ou PF4		Très peu déformable	$1EV2 > 200$

- Classification des sols en fonction de leur portance selon le CEBTP, 1984

La classification des sols suivant la méthode CEBTP-LCPC, 1984 en fonction de leur portance (indice CBR) est résumée dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Classe de portance selon la méthode CEBTP français, 1984

Classe de sols	Portance
S1	$CBR \leq 5$
S2	$5 \leq CBR \leq 10$
S3	$10 \leq CBR \leq 15$
S4	$15 \leq CBR \leq 30$
S5	$CBR > 30$

1.7.3 Recherche de carrière de matériaux d'emprunt

1.7.3.1 Généralités sur les matériaux routiers

Une carrière est le lieu d'où sont extraits des matériaux de construction tels que la pierre (la carrière est dans ce cas parfois appelée perrière), le sable ou différents minéraux non métalliques ou carbonifères. Le mode d'exploitation distingue les carrières à ciel ouvert, les carrières souterraines et les carrières sous-marines.

Les carrières extraient des minéraux indispensables, notamment pour le secteur du BTP. La production des carrières peut se présenter sous forme de sable, de pierres ou d'autres

minéraux non métalliques ou carbonifères. Les carrières exploitent des gisements de différents types : alluvionnaires, calcaires, de roches métamorphiques, de grès ou d'éboulis.

La recherche de carrière est une étape très importante dans l'élaboration d'un projet de construction routière. Le cout de la réalisation de tout projet de construction dépend essentiellement du cout de transport des matériaux à mettre en œuvre lors de la résiliation du projet. Ainsi l'exploitation des carrières situant dans les zones environnantes du projet est la meilleure solution afin de réduire le cout de la construction.

Les matériaux utilisés dans le cadre de notre projet sont essentiellement la terre de barre et les graves latéritiques.



a) Carrière de calcaire



b) Carrière de latérite

Photo 15 : Carrière de calcaire et de latérite

1.7.3.2 Recherche de carrière

Cette opération consiste à chercher des carrières de matériaux de chaussées et d'agrégats dans les environs immédiats de la zone du projet afin de réduire le cout de la réalisation du projet.

Deux volets seront identifiés pour cette activité avec les opérations suivantes :

- Carrières des agrégats
- Gîtes de matériaux pour remblais et matériaux latéritiques (pour couches de chaussée).

1.7.3.3 Essais géotechniques sur les agrégats et les matériaux pour remblais et matériaux latéritiques

Les essais réalisés sur les agrégats sont :



Le sable

- Essai de densité apparente (NF EN 1097-3)
- L'analyse granulométrique par tamisage (NFP 94-056)
- Essai des limites d'ATTEMBERG (NF P94-051)
- Essai de VBS (Valeur au Bleu du Sol) (NF P94-068)
- Essai d'équivalence de sable.



Les graviers

- Essai de densité apparente (NF EN 1097-3)
- L'analyse granulométrique par tamisage
- Essais Los Angeles
- Essais Micro-Deval.

Après identification des carrières, un prélèvement d'emprunts est fait afin de faire l'identification complète du matériau en place. Les essais réalisés sur le matériau sont :

- Essai de densité apparente (NF EN 1097-3)
- Essai d'analyse granulométrique (NFP 94-056)
- Essai des limites d'ATTEMBERG (NF P94-051)
- Essai de VBS (Valeur au Bleu du Sol) (NF P94-068)
- Essai PROCTOR (NF P94-093)
- Essai CBR (Californian Bearing Ratio) (NF P94-078).

Certains essais ont été développés dans les paragraphes précédents. Nous allons développer le reste dans la suite de notre document.

1.7.3.3.1 Essai d'équivalence de sable.

Principe de l'essai

La présente norme européenne spécifie une méthode de détermination de l'équivalent de sable dans la fraction 0/2 mm des sables et des graves. Elle s'applique également aux agrégats naturels. Cet essai consiste à :

- (i) verser une prise d'essai de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué et agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai
- (ii) «Irriguer» alors le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable
- (iii) (iii) après 20 min, calculer l'équivalent de sable (SE) comme la hauteur de sédiment, exprimée en pourcentage de la hauteur totale de matériau flocculé dans le cylindre.

Matériels

- Deux cylindres gradués, en verre transparent, munis d'un bouchon en caoutchouc
- Ensemble du piston d'essai
- Chronomètres
- R  glet de 500 mm, gradué en millimètres
- Tamis de contrôle, à mailles carrées de 2 mm
- Brosse à tamis
- Spatule
- Tube laveur muni d'un robinet à la partie supérieure
- Flacon, en plastique transparent, d'une contenance de 5 l, muni d'un système de siphon, dont le fond est placé à environ 1 m de la table de travail
- Tube en plastique, d'une longueur approximative de 1,50 m, et de diamètre interne approximatif de 5 mm, reliant le tube laveur au siphon
- Entonnoir
- Machine d'agitation
- Thermomètre, d'une précision de 1   C
- Balance de portée 220 g et de précision 0,01 g.



Photo 16 : Matériels pour réalisation de l'équivalent de sable

Méthode

• Préparation de la solution concentrée

- Dissoudre (219 ± 2) g de chlorure de calcium cristallin $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ou 111 g de chlorure de calcium anhydre, CaCl_2 dans (350 ± 50) ml d'eau distillée ou déminéralisée
- Laisser refroidir à température ambiante
- Ajouter (480 ± 5) g de glycérine et $(12,5 \pm 0,5)$ g de formaldéhyde en solution et diluer à 1 L de solution avec de l'eau distillée ou déminéralisée ;
- Mélanger vigoureusement.

• Préparation des prises d'essai

L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/2 mm à une teneur en humidité inférieure à 2 % et à une température de (23 ± 3) °C. La prise d'essai ne doit pas être séchée dans une étuve. La masse de chaque prise d'essai doit être égale à :

$$\frac{120(100+w)}{100}$$
 (Au gramme près) où w est la teneur en humidité du sable (pourcentage en masse sèche).

• Mode opératoire

- Siphonner la solution lavant dans chaque cylindre gradué, jusqu'au trait repère inférieur figurant sur le cylindre
- A l'aide de l'entonnoir, verser une éprouvette dans chaque cylindre gradué, en maintenant le cylindre dans une position verticale



- Taper le fond de chaque cylindre à plusieurs reprises sur la paume de la main afin de déloger les bulles d'air et de favoriser le mouillage de l'éprouvette
- Laisser reposer pendant 10 min pour humidifier l'éprouvette
- A la fin de cette période de 10 min, boucher un cylindre à l'aide du bouchon en caoutchouc, puis fixer ce cylindre sur la machine d'agitation
- Agiter le cylindre pendant 30 s à l'aide d'un agitateur puis replacer le cylindre sur la table de travail dans la position verticale. Le temps d'agitation correspond à 90 cycles en utilisant l'agitateur mécanique
- Répéter le processus d'agitation avec le second cylindre
- Ôter le bouchon en caoutchouc de l'un des cylindres gradués et le rincer au-dessus du cylindre gradué avec la solution lavant, en s'assurant que tout le matériau retombe dans le cylindre
- En descendant le tube laveur dans le cylindre, rincer tout d'abord les parois du cylindre avec la solution lavant, puis enfoncer le tube de façon à ce qu'il traverse le sédiment au fond du cylindre
- Maintenir le cylindre en position verticale tout en laissant la solution lavant, agiter le contenu en favorisant la remontée des fines particules et des éléments argileux
- Ensuite, tout en faisant subir au cylindre un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur
- Quand le niveau de liquide avoisine le trait repère supérieur gravé sur le cylindre, relever lentement le tube laveur et réguler le flux de façon à maintenir le liquide au niveau du trait repère supérieur jusqu'à ce que le tube soit complètement retiré et le flux interrompu
- Lancer le chronométrage du temps de repos au moment du retrait du tube laveur
- Répéter le mode opératoire de lavage avec le second cylindre
- Laisser reposer chaque cylindre gradué sans dérangement ni vibration, pendant 20,00 min
- A la fin de cette période et à l'aide du réglet mesurer la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond du cylindre gradué
- Abaisser soigneusement l'ensemble du piston dans le cylindre, jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment

- Placer le manchon sur le cylindre, puis le bloquer sur la tige du piston
- Déterminer la hauteur du sédiment h_2 en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon, en introduisant le réglet dans l'encoche du manchon
- Enregistrer les hauteurs h_1 et h_2 au millimètre près.

De la même manière, mesurer et enregistrer les hauteurs h_1 et h_2 sur le second cylindre.

Calcul et expression des résultats

- Calculer le rapport $100 (h_2/h_1)$ pour chaque cylindre avec un chiffre après la virgule
- Si les deux valeurs obtenues diffèrent de plus de 4, le mode opératoire d'essai doit être répété
- Calculer l'équivalent de sable (ES) comme la moyenne des rapports obtenus sur chaque cylindre et enregistrer au nombre entier le plus proche.

Calculs :

L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est donné par les formules suivantes :

$$h_2 = h - h' \quad \text{ES} = \frac{H_2}{H_1} \times 100$$

Tableau 7 : Justification des valeurs de l'équivalent de sable

Qualité du sable	ES au piston en
Sable argileux : à ne pas utiliser	$ES < 60$
Sable légèrement argileux : admissible pour bétons courants	$60 \leq ES < 70$
Sable propre : convient pour les bétons de haute qualité	$70 \leq ES < 80$
Sable très propre : absence presque totale de fines argileuses	$ES \geq 80$

Classe de portance selon la méthode CEBTP français, 1984.

1.7.3.3.2 Essai de los Angeles

But et principe de l'essai

Cet essai permet de savoir la dureté d'un matériau en calculant un coefficient appelé coefficient los Angeles. Ce coefficient permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats grâce à une charge de boulets.

L'essai consiste à mesurer une masse **m** d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

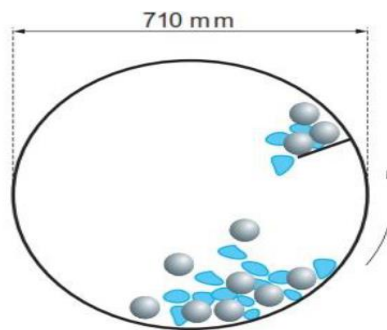


Figure 16 : Principe de l'essai los Angeles

Appareillage

- La machine los Angeles comprend :

Un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, de diamètre intérieur 711 mm et de longueur 508 mm à l'intérieur de ce cylindre est fixé, dans le plan diamétral, une tablette en acier de largeur 90 mm et d'épaisseur 25 mm entraîné en rotation régulière à raison de 30 à 33 tr/mn.



Photo 17 : Appareil de los Angeles

- Les charges de boulets :

Ce sont des boulets sphériques de diamètre 47 mm en acier, de masse comprise entre 420 et 445 g.

Exécution de l'essai

La masse de l'échantillon à envoyer au laboratoire sera au moins de 15 Kg.

- Choisir la classe granulaire qui va être soumise à l'essai, cette classe est choisie parmi les six classes 4-6,3 mm ; 6,3-10 mm ; 10-14 mm ; 16-31,5 mm et 25-50mm. La classe 10-25 mm doit contenir 60% de 10-16 mm, la classe 16-31,5 mm 60% de 16-25 mm et la classe 25-50 mm 60% de 25-40 mm
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand.
- Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure ne diffèrent pas de plus de 0,1%, la masse de l'échantillon pour essai sera de 5000 g.
- Introduire la charge (nombre de boulets) correspondant à la classe granulaire choisie puis l'échantillon pour essai ;
- Faire effectuer à la machine le nombre de tours correspondant à la fraction granulaire choisie.



- Une fois le nombre de tours est terminé, recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac pour éviter les pertes de matériaux.
- Tamiser le matériau recueilli sur le tamis 1,6 mm, le matériau doit être pris plusieurs fois pour faciliter l'opération de tamisage.
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm, égoutter ce refus et le sécher à 105 °C jusqu'à masse constante à l'étuve.
- Peser ce refus séché (M_1)



Calculs

Le coefficient de Los Angeles **LA** est donné par le rapport suivant :

$$LA = \frac{5000 - M_1}{5000} \times 100$$

1.7.3.3 Essai Micro Deval (NF-EN1097-1)

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats, et la détermination de la dureté d'un matériau en se basant sur le calcul d'un coefficient MDE



But et principe de l'essai

Il a pour but de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

L'essai s'effectue sur les gravillons de classe comprise entre 4 et 14 mm et entre 25 et 50 mm Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par frottements réciproques, dans un cylindre en rotation, en présence des charges abrasives et de l'eau

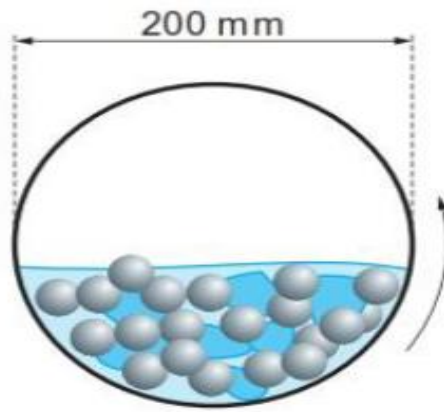


Figure 17 : principe de l'essai micro deval

Source : Civilmania.com

La résistance à l'usure est mesurée par la quantité, appelé coefficient micro-deval en présence de l'eau (MDE), définie par :

$$\text{MDE} = \frac{\text{Masse d'éléments inférieurs à 1.6mm produits à l'essai}}{\text{Masse du matériau soumis à l'essai}} \times 100$$

Appareillage

- La charge abrasive sous forme des billes.
- Eprouvette cylindrique en fer muni d'une plaque de fermeture avec des vis.
- Un récipient gradué.
- Tamis 1.6 mm.
- Appareil de miro deval.

Exécution de l'essai

- Choisir la classe granulaire qui va être soumise à l'essai parmi les quatre classes suivantes : 4-6.3 mm, 6.3-10 mm, 10-14 mm et 25-50 mm La classe 25-50 mm doit contenir 60% de 25-40 mm
- Prendre un échantillon de masse égale au moins à 2 Kg si la classe choisie est comprise entre 4 et 14 mm, et 40 Kg si la classe choisie est 25-50 mm
- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °C.
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie. La masse M de l'échantillon pour essai (500 g ± 2 g pour les classes entre 4 et 14 mm, et 10000 g ± 20 g pour la classe 25-50 mm).
- Introduire dans le cylindre d'essai la charge abrasive, puis la quantité du matériau préparé et de l'eau et en suite mettre en rotation l'ensemble à une vitesse de 100 tr/mn pendant 2h20 min, ceci conformément aux indications du tableau suivant :

Tableau 8 : Caractéristique de l'essai MDE pour chaque classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)	Quantité d'eau (l)	Durée de rotation (tours ou heures)
4 – 6.3	2000 ± 5	2.5	12000tr ou 2h
6.3 - 10	4000 ± 5	2.5	12000tr ou 2h
10 - 14	5000 ± 5	2.5	12000tr ou 2h
25 - 50	0	2	14000tr ou 2h20mn



Photo 18 : mode opératoire de l'essai micro deval

Source : Civilmania.com



Photo 19 : Appareil de micro deval, jarre et échantillon



▪ **Calculs et interprétation :**

Une fois le nombre de rotations est terminé, laver le matériau, après avoir recueilli la charge abrasive, sur le tamis **1.6 mm**. Sécher le refus sur ce tamis à 105 °C et en suite le peser, soit **m'** sa masse.

Calculer la masse (**m**) des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai par :

$$m = M - m'$$

Calculer le coefficient Micro-Deval par :

$$MDE = \frac{m}{M} \times 100$$

Ou **M** = 500 g ou 1000 g



**PRESENTATION DES RESULTATS
ET DISCUSSIONS, DIFFICULTES
RENCONTREES ET
SUGGESTIONS**

1.8 Résultats des essais in situ

1.8.1 Résultats de sondage à la tarière manuelle

Le sondage à la tarière effectué au PK0+962.5 et au PK1+105.5 nous donne les résultats suivants.

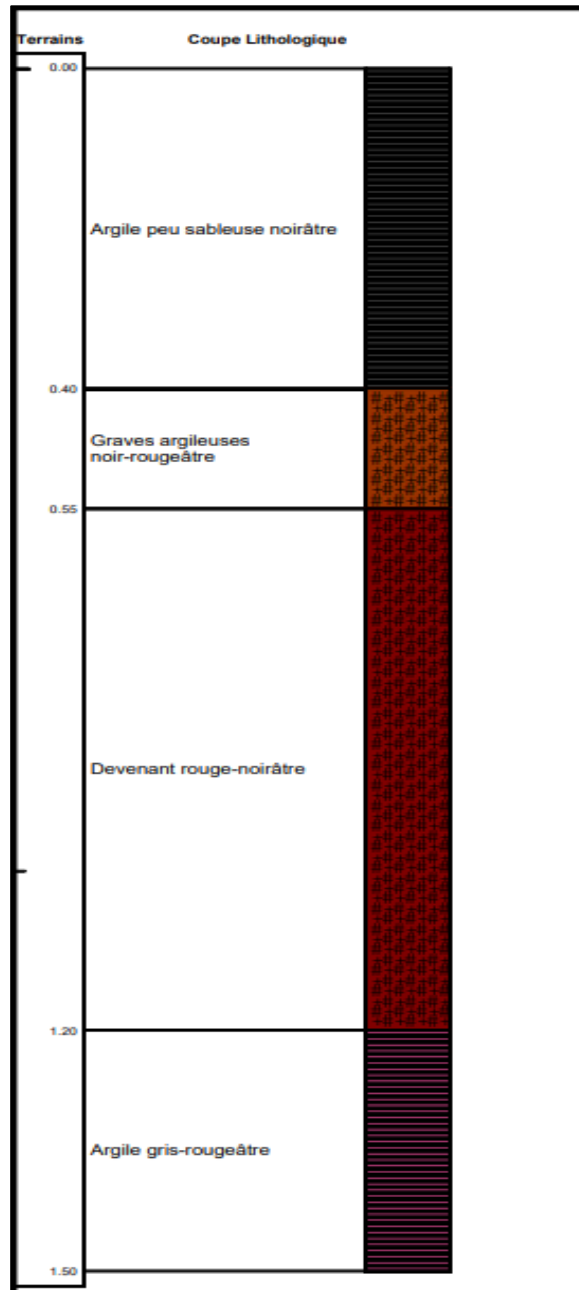


Figure 18 : Coupe géologique du sol



Ces résultats nous montrent que nous avons à un mètre (1 m), au PK0+962.5 de graves argileuses plastiques jaunâtres et d'argile peu sableuse plastique rouge-noirâtre au PK1+105.5.

1.8.2 Résultats d'essai au pénétromètre dynamique

Les résultats obtenus montrent que la contrainte du sol est faible jusqu'à 2 m de profondeur (voir courbe pénétrométrique présentée dans les résultats du laboratoire en annexe). A 1 m de profondeur, la contrainte admissible du sol est de 0,41 bars, ce qui signifie que le bâtiment a été érigé sur un sol de très faible contrainte (un mauvais sol). Ce qui peut provoquer des risques de tassement différentiel de l'ouvrage.

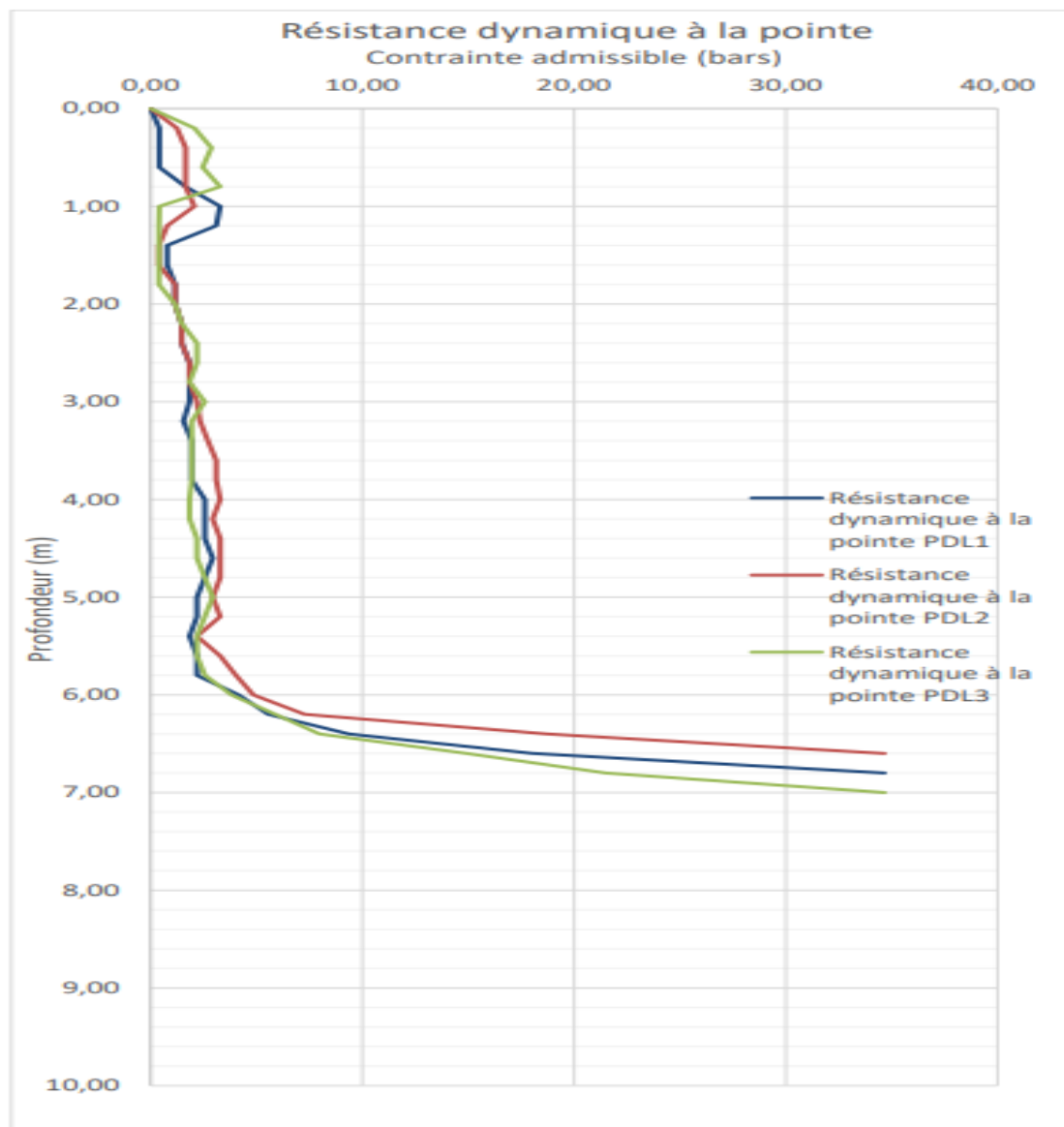
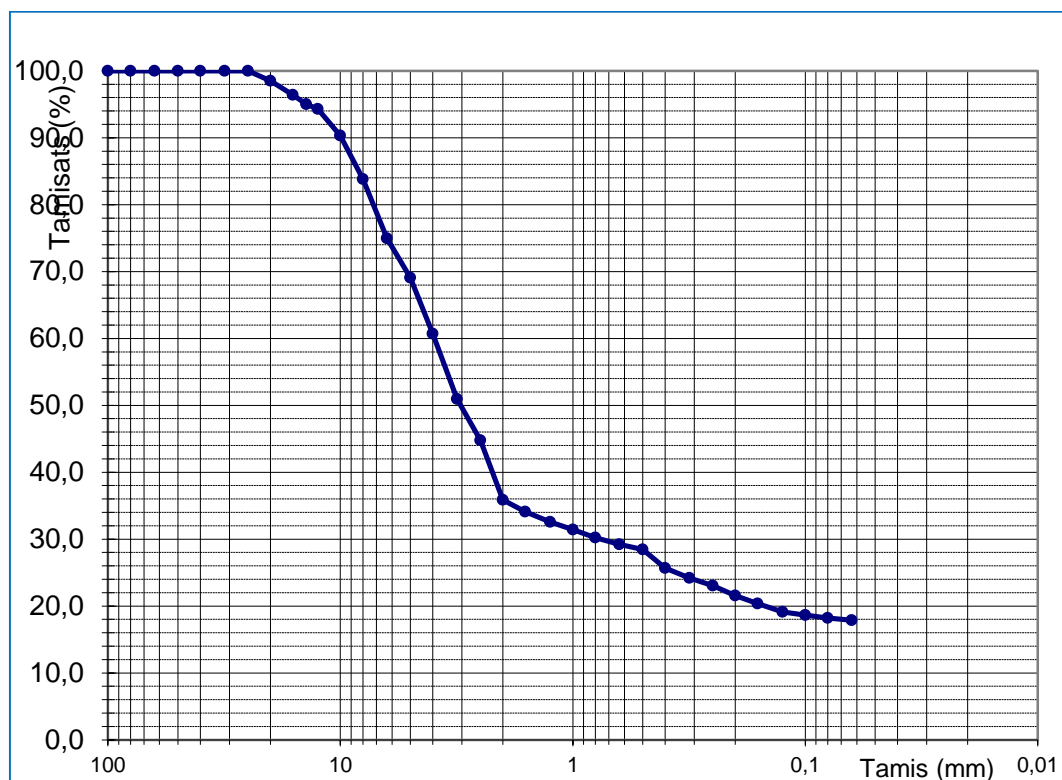


Figure 19 : Courbe pénétrométrique

1.9 Résultats d'essais de caractérisation des sols en laboratoire

1.9.1 Essai d'analyse granulométrique par tamisage

La distribution granulométrique des grains du matériau est traduite par la courbe granulométrique suivante.



Graphique 1 : Courbe granulométrique

Les résultats de cet essai nous révèlent que le pourcentage de passant à 63 μm est de 23,30%.

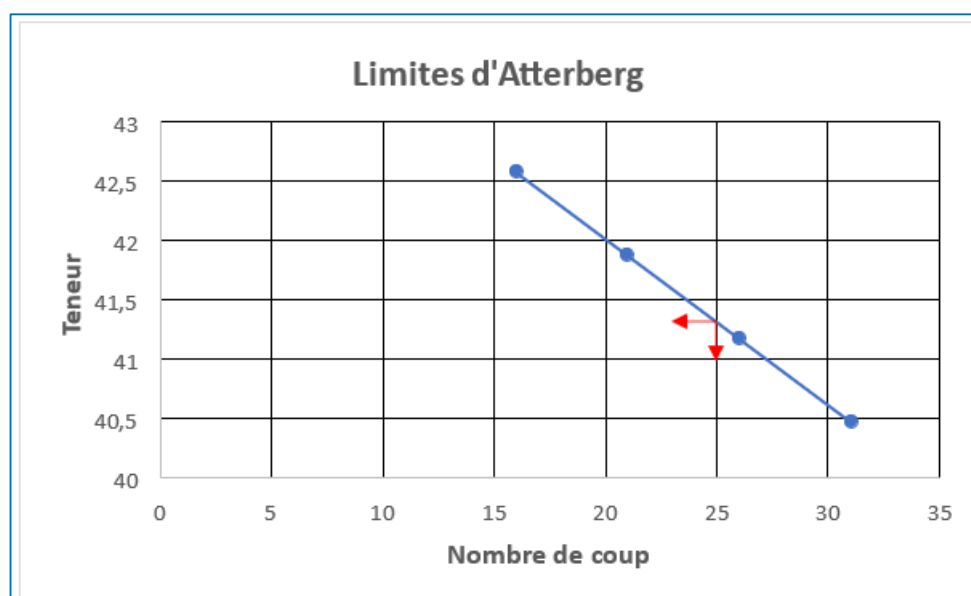
1.9.2 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'apprécier le degré d'argilosité du matériau. La limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité du matériau sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 9 : les valeurs des limites d'Atterberg

Matériau	W _L	W _P	I _P
Terre de barre	41.30	22	19.3

Le graphe de la figure ci-dessous montre le nombre de coups provoquant la fermeture de la fente lors de l'essai à l'appareil de Casagrande.



Graphe 2: Limites d'Atterberg

D'après le tableau et la courbe, il ressort que l'indice de plasticité est 19.3 compris entre 12 et 25, alors nous sommes en présence d'un matériau peu plastique (sable-argileux) selon le guide annoncé plus haut.

1.9.3 Teneur en matière organique (XP P 94-055)

Le tableau ci-dessous renseigne sur les masses des prises d'essai, les masses après l'essai et la valeur du taux de matière organique contenu dans notre matériau.



Tableau 10 : Résumé essais MO

Gobelet	1	2	Moyenne
Poids initial Tb	80	80	0.149
Poids sec Tb	79.89	79.87	
P3=P1-P2	0.11	0.13	
Matière organique	0.137	0.162	

A l'issue de cet essai, le taux de matière organique contenue dans le matériau est de 0.149 % < 3%. Notre matériau est alors utilisable dans les constructions génie civil.

1.9.4 Masse volumique réelle (NF EN 1097-6)

La masse volumique réelle des grains solides de notre matériau est 2.55 g/cm³.

1.9.5 Résultats essais VBS

Tableau 11 : Résultats de VBS

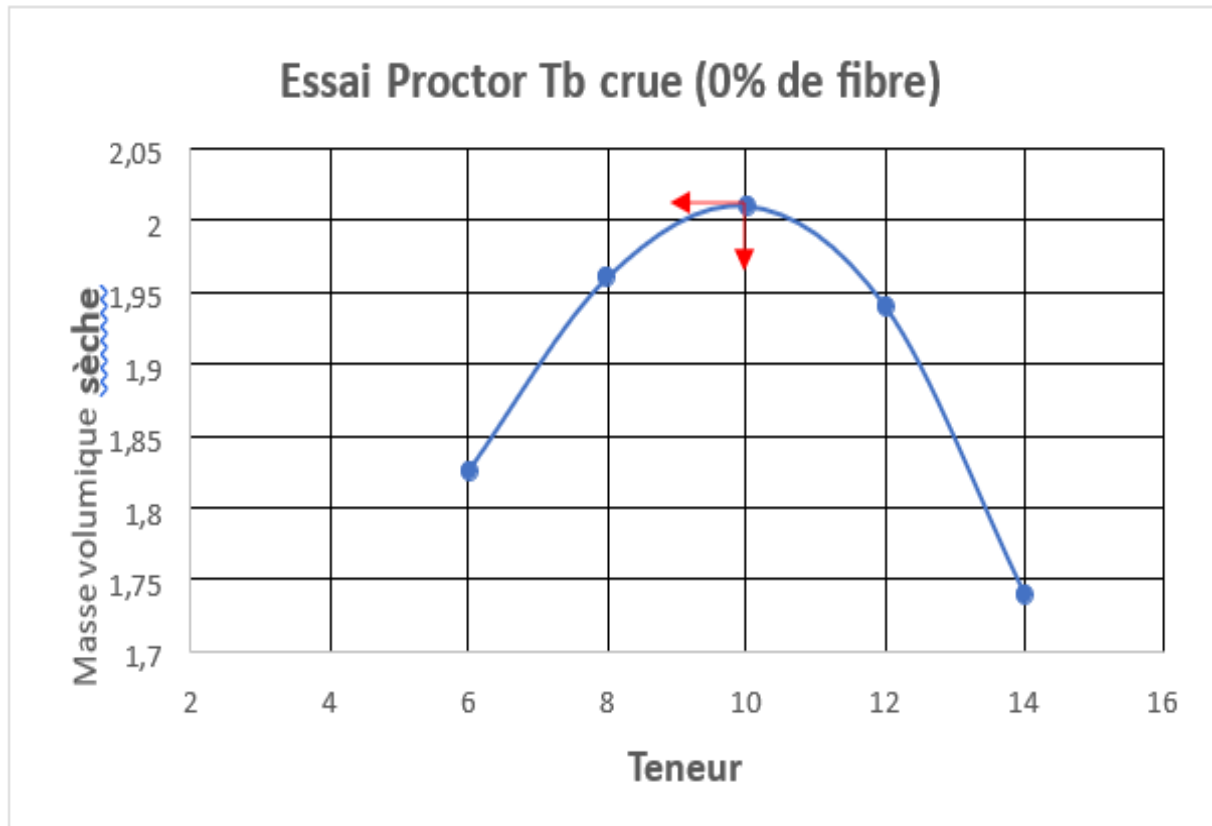
Volume solution injectée (ml)	Résultat test	Valeur de bleu de méthylène VBS
05 ml	Négatif	<p>(Grammes de bleu par kilogramme de fraction 0/5)</p> <p>VBs = (B/M₀) * C* 100</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> VBs = 0,25 </div>
10 ml	Négatif	
15 ml	positif	

La valeur au bleu de méthylène du matériau terre de barre est 0.20

Alors ce matériau est sablo-argileux peu sensible à l'eau.

1.9.6 Essai Proctor modifié

La masse volumique sèche maximale à l'issu de l'essai donne 2.01 t/m^3 et la teneur en eau optimale est de 11,1%.



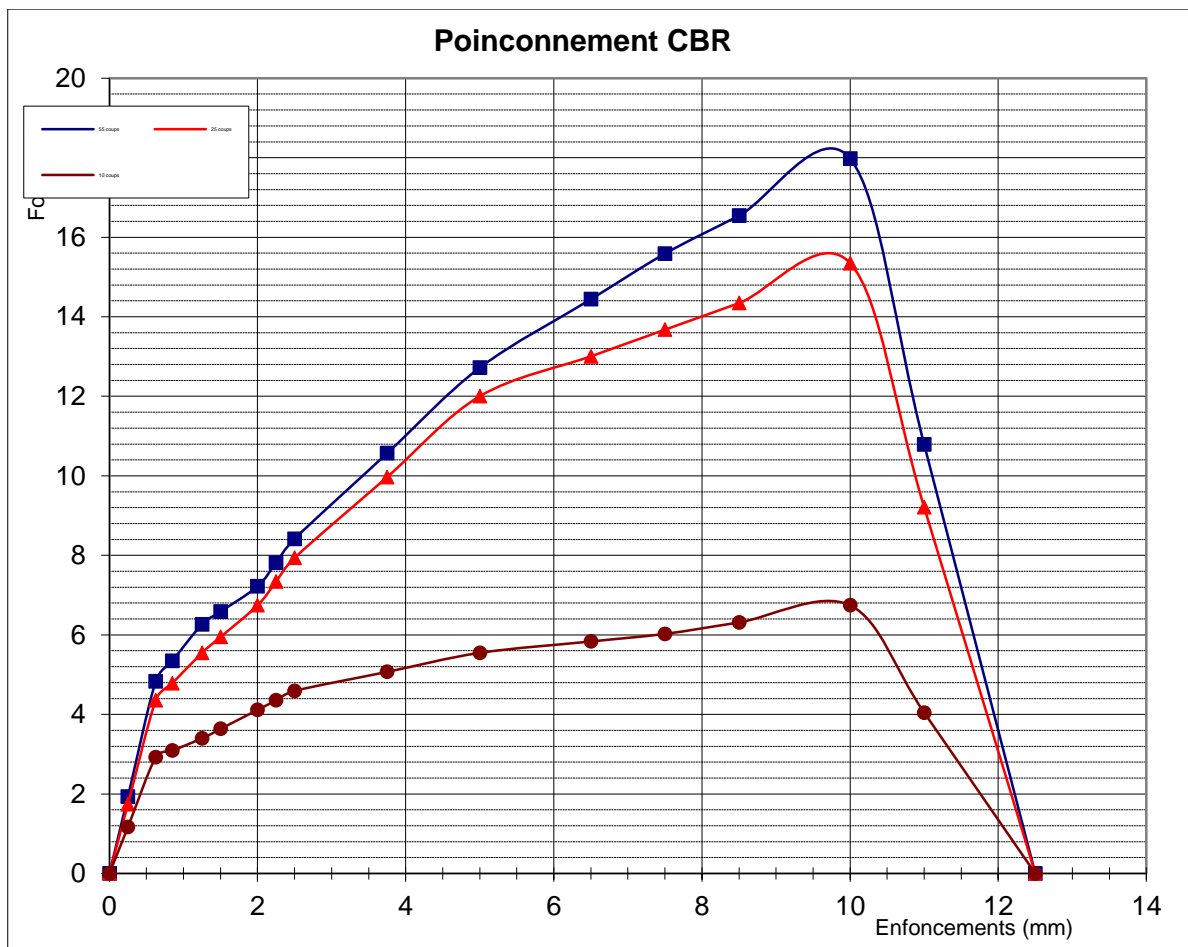
Graphe 3 : Courbe Proctor

L'essai optimum Proctor modifié permet de connaître les caractéristiques de compactage que sont la masse volumique sèche maximale et le teneur en eau optimale. Ces paramètres sont d'une importance capitale dans la mise en œuvre du matériau du fait qu'ils spécifient les conditions de compactage et garantissent une portance maximale du matériau.

Les caractéristiques déterminées ci-dessus ont permis de réaliser l'essai CBR suivant.

1.9.7 Essai Californian Bearing Ratio (CBR) (NF P94-078)

Selon le nombre de coups, la courbe effort-déformation est celle de la figure suivante.



Graphe 4 : Courbe

Tableau 12 : Résultats de l'essai CBR

CALCUL DES INDICES PORTANTS CALIFORNIENS						
	56 coups		25 coups		10 coups	
	2,5 mm	5 mm	2,5 mm	5 mm	2,5 mm	5 mm
	8,42	12,72	7,94	12,00	4,59	5,55
Force (kN)						
CBR	64		60		34	

La valeur du CBR à 95% de l'OPM après immersion à 96 heures est de 34. La valeur du CBR reflète la capacité de portance du matériau compacté à 95% de l'optimum Proctor



modifié. En construction routière, la valeur la plus significative est celle correspondant à 25 coups de dame. En absence de matériel adapté à la mesure du module du matériau à l'essai de plaque, le CBR est utilisé pour estimer ce module moyennant une relation empirique.

1.10 Résultats de recherche de carrières

On a identifié un (01) empreint de graveleux latéritique dans le Village d'Adjahonmè à 12 km de Ahogbéya de puissance 10 à 15000 m³ et extensible. Les caractéristiques géotechniques sont présentées dans le tableau ci-dessous. Pour la fabrication du béton, on utilisera le sable 0/5 et le gravier concassé 5/15 et 15/25 de la carrière de Dan.

Tableau 13 : Caractéristique géotechnique de l'emprunt de graveleux latéritique

Désignation de l'essai		Normes d'essais	Résultats d'essais	Exigences ou Spécifications
Analyse Granulométrique	% Passant Tamis 40 mm	NF EN ISO 17892-4	100%	
	% Passant Tamis 31,5 mm		100%	
	% Passant Tamis 20 mm		99%	
	% Passant Tamis 10 mm		90%	
	% Passant Tamis 5 mm		69%	
	% Passant Tamis 2 mm		36%	
	% Passant Tamis 1 mm		31%	
	% Passant Tamis 0,5 mm		28%	
	% Passant Tamis 0,08mm		18%	
	Fines		18%	5-25
Limite d'Atterberg	WL	NF P 94-051	27	< 40
	IP		11	< 20
Valeur au bleu de Méthylène	VBs	NF EN 933-9	0,15	< 2,5
Matières organiques	C _{MOC}	XP P 94-047	0,31	< 0,5
Essai Proctor Modifié	W _{OPM}	NF P 94-093	10	SO
	γ _d OPM		2,109	> 1,9 t/m3
Indice CBR après 4 jours d'immersion	I CBR à 95% OPM	NF P 94-078	60	> 30
	Indice de gonflement G(%)		0,04	< 0,5%

Tableau 14 : Carrières d'approvisionnement des emprunts

Matériaux	Carrière	Lieu
Latérite	KPEVIDJI	ADJAHONME
Sable	BCG	Dan
Gravier concassé	BCG	Dan



1.11 Discussions

Le tableau suivant récapitule les résultats des différents essais.

Tableau 15 : Résultats des essais sur la plate-forme support de chaussée

Caractéristiques de la plate-forme	
% passant inférieur à $63\ \mu m$	23.30
Indice de plasticité IP	12
Classification GTR (GTR, fascicule 2, 2023)	I2
Densité sèche optimale ($\gamma_{d\ opt}$) en t/m^3	2 .002
Teneur en eau optimale (w_{opt}) en %	12
Indice CBR à 95% OPM	34
Classe de portance (SETRA-LCPC)	P4 ou PF3
Classe de portance (CEBTP, 1984)	S5

Ces résultats montrent que la plate-forme support de chaussée présente un pourcentage de fines inférieur à 35% avec un indice de plasticité égale à 12. On peut alors conclure le matériau de la plate-forme est un sable-argileux.

Les résultats de l'essai CBR montrent que la portance du sol est 34 donc supérieure à 30.

La plate-forme est de classe S4 ou PF3.

Les résultats d'essais réalisés sur les matériaux latéritiques montrent que ces derniers ont les caractéristiques requises pour être utilisé en couche de fondation.

1.12 Difficultés rencontrées

Durant notre séjour à la SNERTP S.A, nous n'avons pas été confrontés à des difficultés majeures. Néanmoins, nous n'avons eu à faire face à quelques –unes à savoir :

Les conditions de travail :

L'utilisation de matériels de substitution pas très moderne pour réaliser certains essais ;

- Le manque de certains matériels



- Le manque d'équipements de protection.

1.13 Suggestions

Il serait préférable d'acquérir les matériels modernes d'une technologie de pointe et d'en avoir assez tôt ces matériels ; de même prévoir des réserves de ces matériels en stock pour les cas d'usure.



CONCLUSION

Au terme de notre stage de fin de formation, il est important de souligner l'aspect enrichissant des connaissances pratiques acquises pour renchérir celles théoriques reçues dans le cadre de notre formation.

Notre séjour à la section de route au SNERTP S.A, vient compléter les notions reçues en formation au Centre Autonome de Perfectionnement de l'Ecole Polytechnique d'Abomey- Calavi. Ce stage a permis la jonction entre la théorie et la pratique. Il nous a permis d'acquérir de nouvelles notions et d'enrichir nos expériences sur les différents modes d'exécutions d'un projet de construction et un aperçu sur des quantités des matériaux utilisés.

Conscients que cette œuvre n'est pas parfaite, à l'instar de toute œuvre humaine, nous vous la soumettons à l'appréciation du président du jury. Vos suggestions en vue de l'amélioration du présent document, nous serons profitables.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cours de mécanique des sols 1 et 2 de Dr Yvette TANKPINOU KIKI ;
- Rapport de fin de formation des années antérieures réalisé par les anciens étudiants ;
- Norme des différents essais d'identification disponible à la SNERTP S.A;
- Cours de route 2 (Conception et Dimensionnement des Chaussées INSTI-LOKOSSA) de Mr PADONOU G.Tankpinou Abdoul Sèmiyoi ;
- Les articles de l'association Française de Normalisation ;
- Navigateur de recherche Google ;
- Source : [https:// www.eos.com](https://www.eos.com)
- Source : [https:// www.eos.com](https://www.eos.com)
- Source : <https://www.infociments.fr>
- Source : [https://www.epdomain. com](https://www.epdomain.com)
- Guide des essais Géotechnique 1-J.Léreau ;
- Gravier express Bénin ;
- Proviteq.com ;
- Civlmania.com.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	iv
SOMMAIRE	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOS	ix
Liste des tableaux	x
Liste des graphes	xi
LISTE DES ACRONYMES	xii
RESUME.....	xiv
Abstract	xv
INTRODUCTION.....	16
CADRE INSTITUTIONNEL ET METHODOLOGIQUE	2
1.1 Présentation du Centre Autonome de Perfectionnement de l'EPAC	3
1.1.1 Historique du Centre Autonome de Perfectionnement (CAP)	5
1.1.2 Filières et Diplômes	6
1.1.3 Situation géographique.....	6
1.2 Présentation de la SNERTP S.A	7
1.2.1 Historique De la SNERTP S.A	7
1.2.2 Situation géographique.....	8
1.2.3 Missions et attributions de la SNERTP S.A	9
1.2.4 Organigramme De la SNERTP S.A.....	9
1.2.5 Activité de la SNERTP S.A	10
1.3 Démarche méthodologique.....	11
DEROULEMENT DE STAGE.....	13
1.4 Généralités sur la route	14
1.4.1 Définition	14
1.4.2 Structure d'une route	14
1.4.3 Les différentes couches de chaussées.....	15
1.4.4 Les différents types de structures de chaussée	15
1.5 Présentation du projet	18
1.6 Description de la zone projet	21
1.6.1 Le cadre physique : la situation géographique du projet.....	21
1.6.2 Climat	22
1.6.3 Relief	23
1.6.4 Sols.....	23

1.6.5	Hydrographique.....	23
1.6.6	Végétation	23
1.7	Présentation des activités menées au cours du stage	23
1.7.1	Réalisation des essais in situ	24
1.7.1.1	Le sondage à la tarière	24
1.7.1.2	Sondage au pénétromètre dynamique	24
1.7.2	Réalisation des essais d'identification sur les sols en laboratoire	26
1.7.2.1	Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1)	26
1.7.2.1.1	Principe de l'essai.....	26
1.7.2.1.2	But de l'essai	26
1.7.2.1.3	Matériels	27
1.7.2.1.4	Méthode.....	27
□	Calculs et interprétation des résultats :	29
1.7.2.2	Analyse granulométrique par sédimentometrie (NP P94-057).....	31
1.7.2.2.1	Principe.....	31
1.7.2.2.2	But de l'essai	31
1.7.2.2.3	Matériels	32
1.7.2.2.4	Mode opératoire :	32
1.7.2.2.5	Calculs et interprétation des résultats	34
1.7.2.3	Essai de teneur en eau (NF P 94-050).....	36
1.7.2.3.1	But de l'essai	36
1.7.2.3.2	Matériels	37
□	Mode opératoire	37
1.7.2.4	Essai de densité apparente (NF EN 1097-3)	37
1.7.2.4.1	But de l'essai	38
1.7.2.4.2	Matériels	38
1.7.2.4.3	Mode opératoire	38
1.7.2.4.4	Résultats	38
1.7.2.5	Essai des limites d'ATTEMBERG (NF P94-051).....	39
1.7.2.5.1	Définition.....	39
1.7.2.5.2	Méthode de Casagrande et méthode du rouleau.....	39
1.7.2.5.3	Matériels	40
1.7.2.5.4	Résultats et interprétation.....	41
1.7.2.6	Valeur au Bleu du Sol (NF P94-068).....	42
1.7.2.6.1	But de l'essai	42
□	Appareillage :	42
□	Calculs :	45

1.7.2.7	Essai Proctor	45
1.7.2.7.1	But de l'essai	47
1.7.2.7.2	Appareillage	47
1.7.2.7.3	Mode opératoire	48
1.7.2.8	Essai CBR (Californian Bearing Ratio) (NF P94-078).....	51
1.7.2.8.1	But de l'essai	52
1.7.2.8.2	Matériels	52
1.7.2.8.3	Mode opératoire	53
1.7.2.8.4	Poinçonnement	54
1.7.2.8.5	Calculs et interprétations	55
1.7.3	Recherche de carrière de matériaux d'emprunt.....	57
1.7.3.1	Généralités sur les matériaux routiers	57
1.7.3.2	Recherche de carrière.....	58
□	Carrières des agrégats	59
□	Gîtes de matériaux pour remblais et matériaux latéritiques (pour couches de chaussée).....	59
1.7.3.3	Essais géotechniques sur les agrégats et les matériaux pour remblais et matériaux latéritiques.....	59
1.7.3.3.1	Essai d'équivalence de sable.	60
	Calculs :	63
1.7.3.3.2	Essai de los Angeles	63
1.7.3.3.3	Essai Micro Deval (NF-EN1097-1)	66
PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSIONS, DIFFICULTES RENCONTREES ET SUGGESTIONS.....		70
1.8	Résultats des essais in situ	71
1.8.1	Résultats de sondage à la tarière manuelle	71
1.8.2	Résultats d'essai au pénétromètre dynamique	72
1.9	Résultats d'essais de caractérisation des sols en laboratoire	73
1.9.1	Essai d'analyse granulométrique par tamisage	73
1.9.2	Les limites d'Atterberg.....	73
1.9.3	Teneur en matière organique (XP P 94-055)	74
1.9.4	Masse volumique réelle (NF EN 1097-6)	75
1.9.5	Résultats essais VBS	75
1.9.6	Essai Proctor modifié	76
1.9.7	Essai Californian Bearing Ratio (CBR) (NF P94-078).....	76
1.10	Résultats de recherche de carrières.....	78
1.11	Discutions	79
1.12	Difficultés rencontrées.....	79



1.13	Suggestions	80
CONCLUSION		81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		83
TABLE DES MATIERES		84