

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Sciences et Techniques en Géophysique et Géomatique

Intitulé :

**ESSAI LABORATOIRE DES SOLS DESTINES A LA
REHABILITATION ROUTIERE DE LA COMMUNE DE
SOAVINA**

Présenté par :

NADHOIM Ibrahima

Le 31 Mai 2019

Devant le jury composé de :

Président : Mr RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier

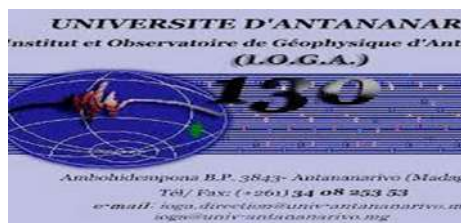
Rapporteur : Mr RAKOTO Heritiana

Examineur : RAJAOMAHEFASOA Riva Eliniaina

Maître de conférences

Maître de conférences

Maître de conférences



Année d'étude 2017-2018



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Sciences et Techniques en Géophysique et Géomatique

Intitulé :

**ESSAI LABORATOIRE DES SOLS DESTINES A LA
REHABILITATION ROUTIERE DE LA COMMUNE DE
SOAVINA**

Présenté par :

NADHOIM Ibrahima

Le 31 Mai 2019



Devant le jury composé de :

Président : Mr RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier

Rapporteur : Mr RAKOTO Heritiana

Examineur : RAJAOMAHEFASOA Riva Eliniaina

Maître de conférences

Maître de conférences

Maître de conférences



Année d'étude 2017-2018

REMERCIEMENTS

On tient à remercier en premier le Dieu Tout Puissant, qui nous a donné la vie, la force, la santé, et le courage d'avoir pu nous conduire jusqu'au bout de ce travail. Ainsi, après à tous ceux qui, par leurs conseils et enseignements, leur confiance et leur sollicitude, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Notre haute et fidèle considération vont précisément à :

- Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier qui, malgré ses responsabilités, nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.
- Monsieur RAKOTO Heritiana, Maître de Conférences, de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant l'encadrement de ce travail, malgré ses nombreuses activités. Il nous a initiés et guidés avec rigueur et persévérance pour la réalisation de ce mémoire.
- Monsieur RAJAOMAHEFASOA Riva Eliniaina, qui a eu l'amabilité de bien vouloir juger ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous exprimons également nos remerciements les plus profonds à :

La société COLAS de nous avoir accepté comme stagiaire et surtout toute l'équipe du Laboratoire central d'Antananarivo à commencer par :

- Madame Marina CHALEMET, chef de service technique et Laboratoire COLAS Madagascar qui m'a donné l'opportunité de prendre part aux connaissances pratiques et de plus au sein de Laboratoire.
- Monsieur Rabakomahery RAMAROJAONA chef laboratoire LCT, encadreur professionnel et toutes les techniciens du laboratoire pour l'assistance qu'ils nous ont offert durant les séjours de stage.

Mes chaleureux remerciements s'adressent également à toute la famille et nos amis pour leurs soutiens moraux et financiers et pour leur patience.

Enfin, renouvelons nos sincères remerciements et gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail !

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

NOMENCLATURE

LISTE DES ABREVIATIONS et DES ACRONYMES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

CHAPITRE I: APERCU GENERAL DU PROJET

CHAPITRE II: ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE

CHAPITRE III: ESSAI EN LABORATOIRE

CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

WEBOGRAPHIES

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

RESUME

NOMENCLATURE

- W_n : teneur en eau naturelle [en %]
- D_{max} : dimension maximale des plus gros éléments contenus dans un sol [mm]
- ρ_s : masse volumique d'un échantillon [T/m^3]
- γ_s : poids volumique d'un solide [KN/m^3]
- I_p : indice de plasticité [%]
- q : charge [Tonne]
- P_l : Pression limite [MPa]
- R_d : Résistance dynamique [MPa]
- MPa : MegaPascal (Unité de la pression, soit $1Mpa=100T/m^2$)
- s : tassement [cm]
- $\emptyset$: diamètre [mm]
- D_c : degré de compacité [%]
- T : Tonne
- N : Newton

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES

MSTGG	: Master en Sciences et Techniques en Géophysiques et Géomatique
IOGA	: Institut et Observatoires Géophysique d'Antananarivo
COLAS	: Cold Asphalt
AFNOR	: Association Française de Normalisation
Pr1 ou PR1	: Point de sondage à la tarière n°01
CBR	: Californian Bearing Ratio
ELS	: Etat limite de service
GNT	: Grave non traité

LISTE DES FIGURES

Figure 1: carte de localisation de la zone d'étude	4
Figure 2: carte de localisation des Communes.....	5
Figure 3: carte topographique de la zone d'étude.	6
Figure 4: Carte Géologique de la Zone	9
Figure 5: schéma de la structure de la plate-forme support de chaussée (pfsc)	10
Figure 6: Tarière.....	17
Figure 7:Accessoire de la tarière	18
Figure 8: Clé de retenue	18
Figure 9 : prise d'échantillonnage	20
Figure 10:Tamis	23
Figure 11:Traçage de la rainure	28
Figure 12: Remplissage de la coupelle.....	28
Figure 13:Fermeture de la rainure	28
Figure 14: Moules et Dames Proctor.....	31
Figure 15 : Carte des ponts de sondage de la plate-forme	36
Figure 16: Résultat de la limite de liquidité (WL)	41
Figure 17 . Diagramme Casagrande de plasticité et classification des sols fins	44
Figure 18 : Résultat de la courbe Proctor modifié	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° 1 : Degré de plasticité	26
Tableau n° 2 : Module de compactage PROCTOR.....	32
Tableau n° 3 : Feuille de mesure de la Teneur en eau naturelle.....	38
Tableau n° 4 : Des résultats de la teneur en eau naturelle.....	39
Tableau n° 5 : Résultats de la granulométrie et des poids spécifiques	40
Tableau n° 6 : Fiche d'essais de la limite de liquidité.....	41
Tableau n° 7 : Fiche d'essais de la limite de plasticité.....	42
Tableau n° 8 : Synthèse des résultats de la limite d'Atterberg sur les quatre PK	43
Tableau n° 9 : Classification selon les normes GTR des sols fins	45
Tableau n° 10 : Pour le calcul du Proctor modifié	47
Tableau n° 11 : Résultats de l'indice portance CBR sur les quatre PK.....	49
Tableau n° 12 : Classifier la portance du sol selon la méthode LCPC.....	50
Tableau n° 13 : Récapitulation des résultats	51
Tableau n° 14 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS	52

LISTE DES PHOTOS

Photos 1 : Refus dans les différents tamis	25
Photos 2 : Appareil Casa grande pour limite d'Atterberg	27

INTRODUCTION

Dans le groupe de géosciences, la géotechnique est la technoscience consacrée à l'étude de la subsurface sur laquelle notre action directe est possible pour son aménagement et/ou son exploitation, lors de l'opération de construction bâtiment et de mise en place des travaux publics, de gestion des eaux souterraines (exploitation, drainage) et de prévention des risques naturels. Pour cela, elle doit s'appuyer sur les différentes branches des sciences de la terre suivantes : géologie, géophysique, hydrogéologie, mécanique des roches et des sols, géodynamiques et géochimie. Il est évident qu'on ne peut construire ou réhabiliter sur un terrain sans connaître la nature de son sol.

De ce fait, pour assumer une construction durable, il est fondamental de savoir les caractéristiques des sols de construction, de respecter les critères et conditions de mise en œuvre. Par conséquent, le choix du sol est très important car il ne s'agit pas seulement de maîtriser les différents essais en laboratoire et aussi de savoir analyser les résultats et en fin de déterminer les types de construction pour un sol identifié.

Ainsi, plusieurs questions se posent :

Quel est le moyen utilisé pour connaître la nature du sol ? Et comment va-t-on réhabiliter une infrastructure donnée, une route pour notre cas d'étude ?

L'étude portant sur la caractérisation des propriétés géotechniques et de la mise en œuvre des sols routiers a pour objet de dimensionner l'éventuelle modification à apporter au terrain de réception (sa mise en œuvre et la détermination pratique des conditions de compactages).

La géotechnique a comme objectif d'étudier les comportements mécaniques du sol, et ce, indépendamment des conditions pratiques de son utilisation.

La connaissance des propriétés géotechniques d'un sol permettra de déduire leur utilisation possible pour un ouvrage déterminé.

Le test débute par l'identification de la structure mécanique du sol (granulométrie, cimentation, composition, etc...), car elle permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet de construction ou lors de l'expertise de sinistres.

De ce fait, nous traitons dans le cadre de ce présent mémoire intitulé «**ESSAI LABORATOIRE DES SOLS DESTINES A LA REHABILITATION ROUTIERE DE LA COMMUNE DE SOAVINA**», l'analyse faite et aussi le test géotechnique réalisé sur le sol.

Sommairement, notre étude est divisée en quatre chapitres :

- Le premier nous donne l'aperçu général du projet;
- le second est axé sur l'organisation de la reconnaissance ;
- le troisième est aussi focalisé sur les essais laboratoires ;
- enfin, tous les résultats et interprétations sont développés dans le chapitre quatre.

CHAPITRE I
APERCU GENERAL
DU PROJET

CHAPITRE I APERCU GENERAL DU PROJET

I. 1. CONTEXTE GENERAL

Ce travail met en évidence la réhabilitation routière de Sisaony/Soavina. L'objectif principal de la reconnaissance est de déterminer les caractéristiques mécaniques de sol d'emprunt pour matériaux de remblai qui permettra à l'ingénieur ou au technicien de préciser son utilisation possible ou non à un ouvrage. On a alors effectué des essais en laboratoire (la limite d'atterberg, Proctor modifié, CBR) et aussi des tests in situ et des prélèvements par tarière pour connaître la nature du sol et sous-sol.

Cette étude permet de maîtriser tous les éléments qui pourraient être nécessaires à l'élaboration du projet afin d'évaluer d'une manière générale l'étude de la description sommaire, la situation géographique, afin de connaître le contexte géologique.

I. 2. Description sommaire du projet

Le projet se porte sur la réhabilitation de la piste reliant Anosizato et la commune d'Ampahitrosy, au niveau de la commune Soavina.

Il s'agit de la reconstruction de chaussées qui a été dégagée lors de la rupture d'une digue de rive droite de la rivière Sisaony. Les données géotechniques issues de cette étude permettront sans doute au maître d'ouvrage, ainsi qu'à l'entrepreneur de connaître de façon rationnelle le cout et les matériaux appropriés.

I.3. Situation géographique

La zone est localisée dans la région d'ANALAMANGA, dans le district d'ANTANANARIVO ANTSIMONDRANO, dans la Commune SOAVINA. La piste concernée par l'étude a une longueur totale de 9km, elle relie les deux communes Anosizato Andrefana et Ampahitrosy.

Localisation de la zone d'étude

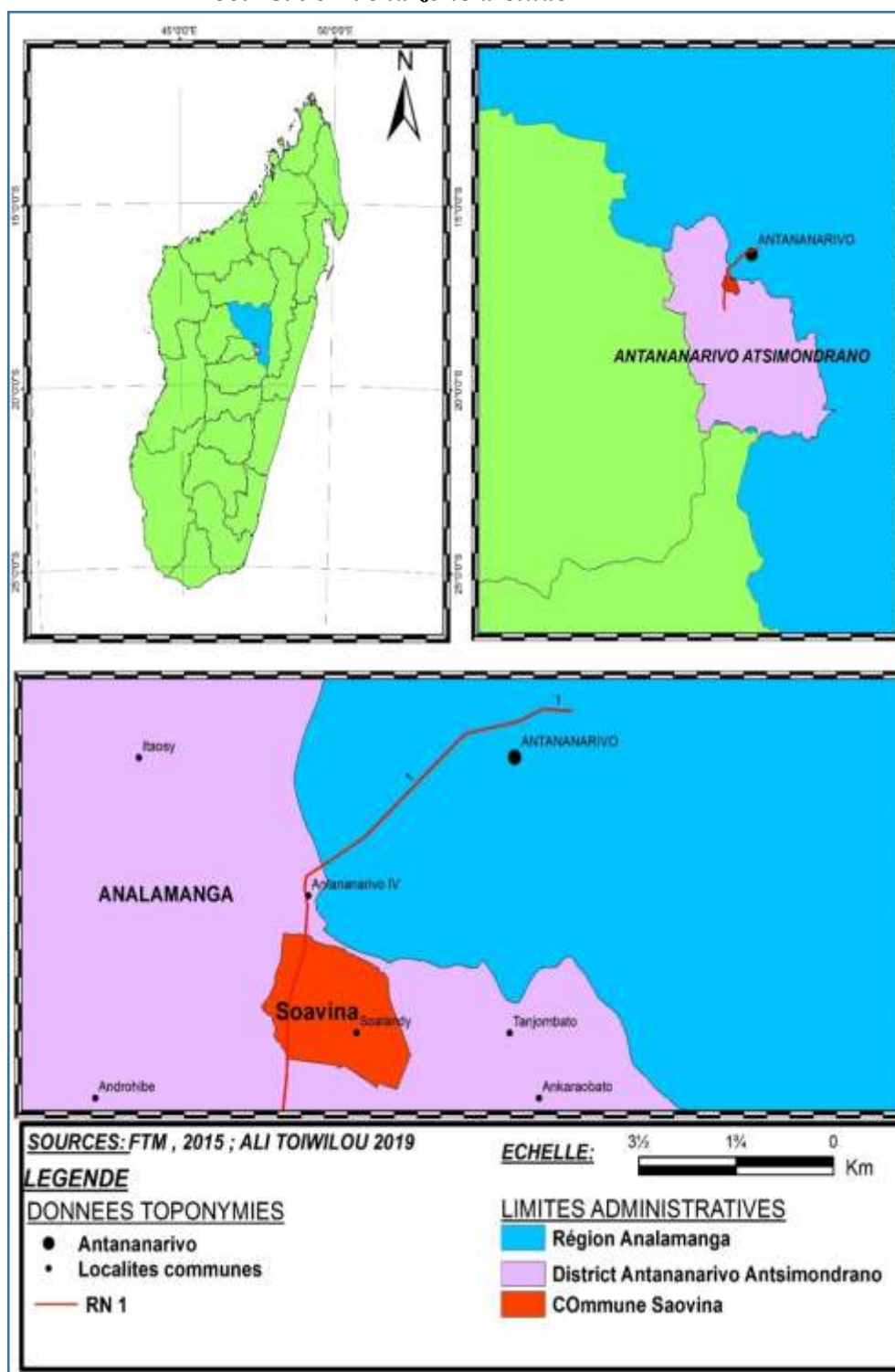


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude

La portion de piste concernée par la réhabilitation est localisée géographiquement entre les Latitudes Sud 18° 53' 030'' et 18° 63' 30,8'', et entre les Longitudes Est 047° 02' 50,6'' et 047° 29' 30,2''.

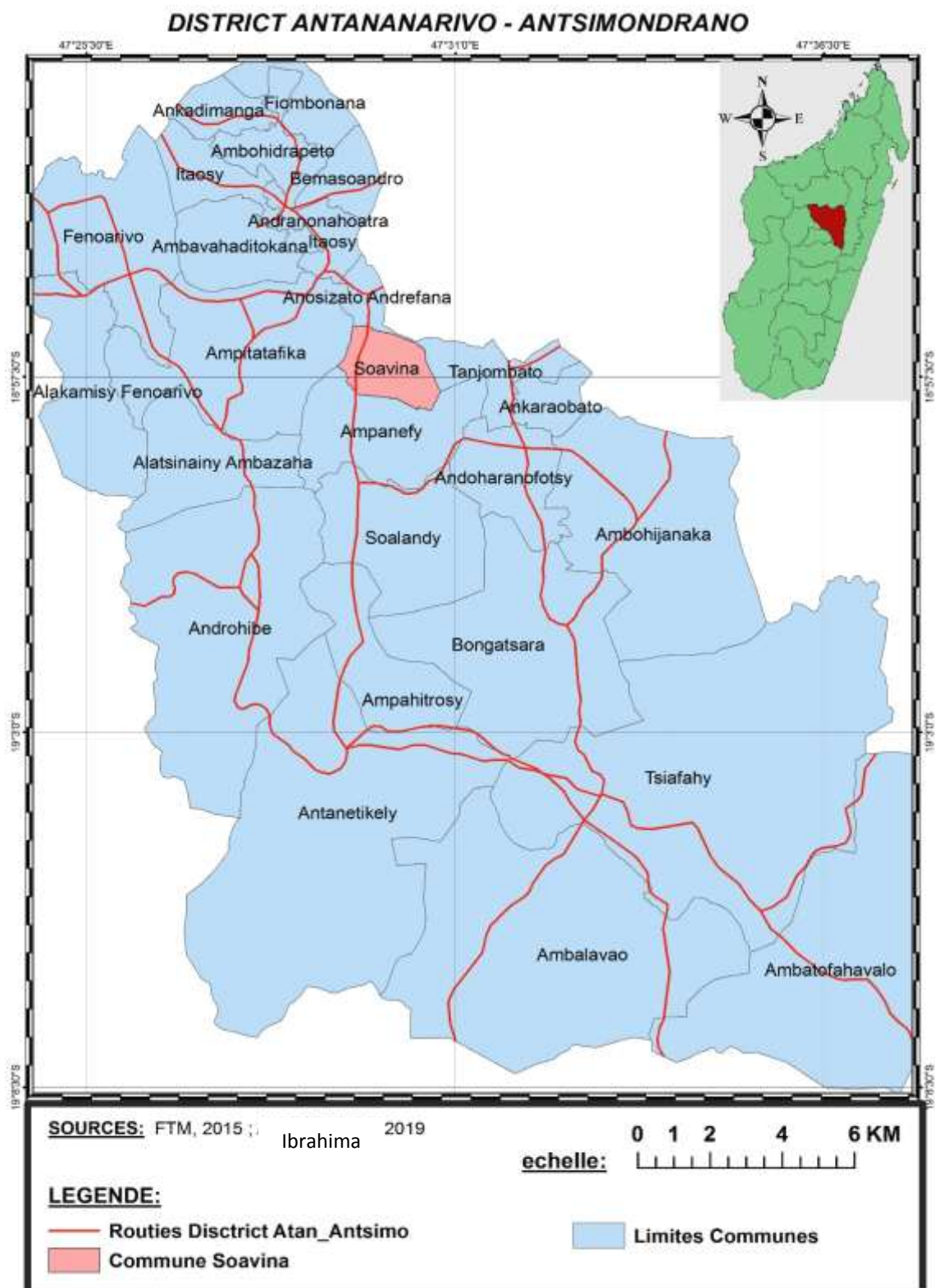


Figure 2: carte de localisation des Communes

I. 4. Topographie du site

La zone se trouve dans le bas-fond, partie Ouest de la plaine d'Antananarivo qui est aussi appelée plaine de Betsimitatatra. La piste est installée sur une digue protégeant la zone d'habitation de l'Est au débordement de la rivière Sisaony pendant la période des hautes eaux. Notons que la plaine est aménagée par la population environnante en rizière. Elle est limitée à l'Ouest par le versant de la colline d'Ambohimangidy et à l'Est par le versant de la colline de Soavina.

Données topographique de la zone

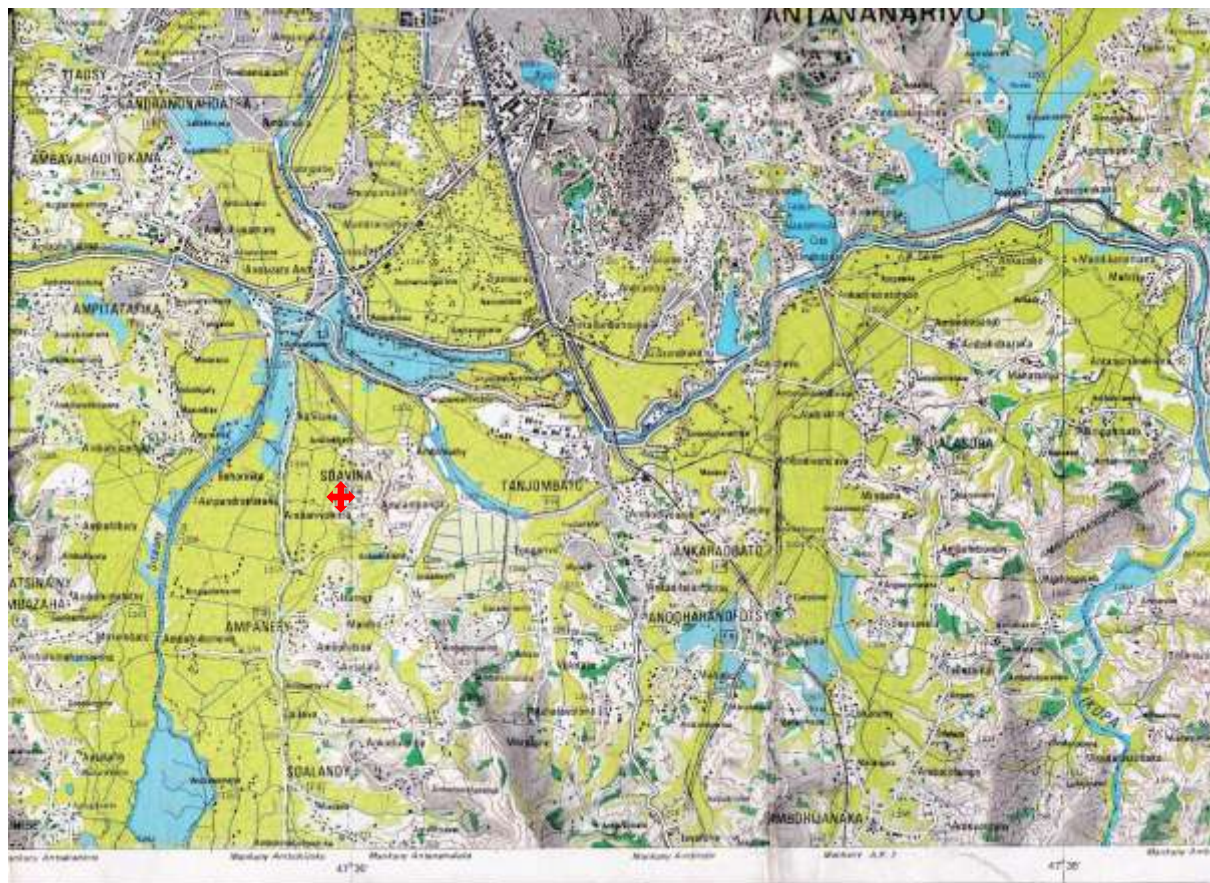


Figure 3: Topographie de la zone d'étude.

I. 5. Contexte géologique

L'organisation du paysage nous amène à décrire la nature des terrains rencontrés en les regroupant par unité géomorphologique : interfluves (où la couverture latéritique domine), bas-fonds, plaines alluviales.

Socle cristallophyllien

Le socle est formé par un complexe cristallophyllien. Les roches qui constituent le socle de la zone d'étude ont été regroupées en deux ensembles sur la base de critères lithologiques, structuraux et de sensibilité à l'altération : les granitoïdes et les orthogneiss.

Ces roches indurées ont fini par se mettre en place au Paléozoïque, période pendant laquelle ce socle a subi une pénéplanation. Les reliefs résiduels correspondent aux roches les moins facilement altérables.

Le plus souvent, ce socle ancien n'est pas affleurant, y compris au droit des interfluves où il est présent sous un recouvrement altéritique qui peut atteindre une cinquantaine de mètres. La succession des faciès d'altération varie comme suit, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base :

- un horizon ferralitique rouge de quelques mètres,
- des altérites (horizon altéritique kaolinique) qui correspondent à la zone d'argilisation des matériaux altérés,
- des arènes micacées, un matériau arénitique argilo-sableux,
- le socle sain lui-même.

Plaine alluviale

La plaine alluviale est le résultat du remplissage d'un compartiment effondré du socle. Les sédiments dans la plaine du Betsimitatatra sont peu épais et s'amincissent de l'amont vers l'aval du fait de la pente du socle sous-jacent : ils ne dépassent jamais une trentaine de mètre d'épaisseur dans la partie Sud de la plaine, ne sont plus épais que de 8 m au confluent de la Sisaony et de l'Ikopa et disparaissent à l'aval, au niveau du seuil de Bevomanga.

La succession des faciès alluvionnaires varie comme suit, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base :

- une formation limono-argileuse superficielle peu épaisse, qui constitue le substratum des rizières ;
- des argiles jaunes ou grises, de 0.5 à 3.0 m d'épaisseur, plus ou moins mélangées à de la tourbe ;
- le plus souvent un niveau de tourbe franche, qui peut atteindre 1.5 m d'épaisseur
- un niveau d'argiles blanches, kaoliniques plus ou moins sableuses, qui peut atteindre 2 m d'épaisseur.
- Des sables, qui peuvent atteindre 10m à 15 m d'épaisseur. Leur granulométrie s'accroît vers la base.

Ces alluvions reposent sur un matériau arénitique non remanié, issu de l'altération du socle sous-jacent.

Bas-fonds

En dehors de la vaste plaine alluvionnaire, les bas-fonds du Nord et de l'Est de la zone d'étude sont issus des phénomènes de néo-tectonique, des mouvements verticaux du cristallophyllien et des processus d'altération/érosion.

La séquence des matériaux de remplissage est comparable à celle observée dans la plaine alluviale. Quatre matériaux distincts se succèdent sur le socle :

- au lieu d'un recouvrement alluvial, le recouvrement est d'origine colluvial et/ou anthropique (un apport anthropique de matériaux argileux est parfois effectué lorsque le recouvrement colluvial n'est pas suffisant pour créer une couche suffisamment imperméable en fond de rizières), mais toujours argilo-limoneux ;
- le niveau tourbeux est souvent présent dans les bas-fonds ;
- le niveau de sables n'est épais que de 20 à 60 cm et ne dépasse généralement pas de 1 à 2 m. Ce niveau correspondrait à une « nappe de fluage » des altérites évacuées lors de la formation du bas-fond. Il repose en discontinuité, localement soulignée par une « stone-line quartzeuse » sur le niveau sous-jacent :
 - les arènes non remaniées.
 - Les bas-fonds sont caractérisés par l'allure plane de leur surface supérieure et souvent l'horizontalité de leur éponte.

Notre secteur d'étude étant situé dans une zone de transition de bas fond et de plaine alluviale, alors l'épaisseur de sable est relativement faible. Elle atteint rarement la puissance observée dans les plaines alluviales.

- Socle rocheux
- Quartzites
- Marbres (cipolin)
- Basalte et gabbros
- Des alluvions

Contexte Géologique de la zone

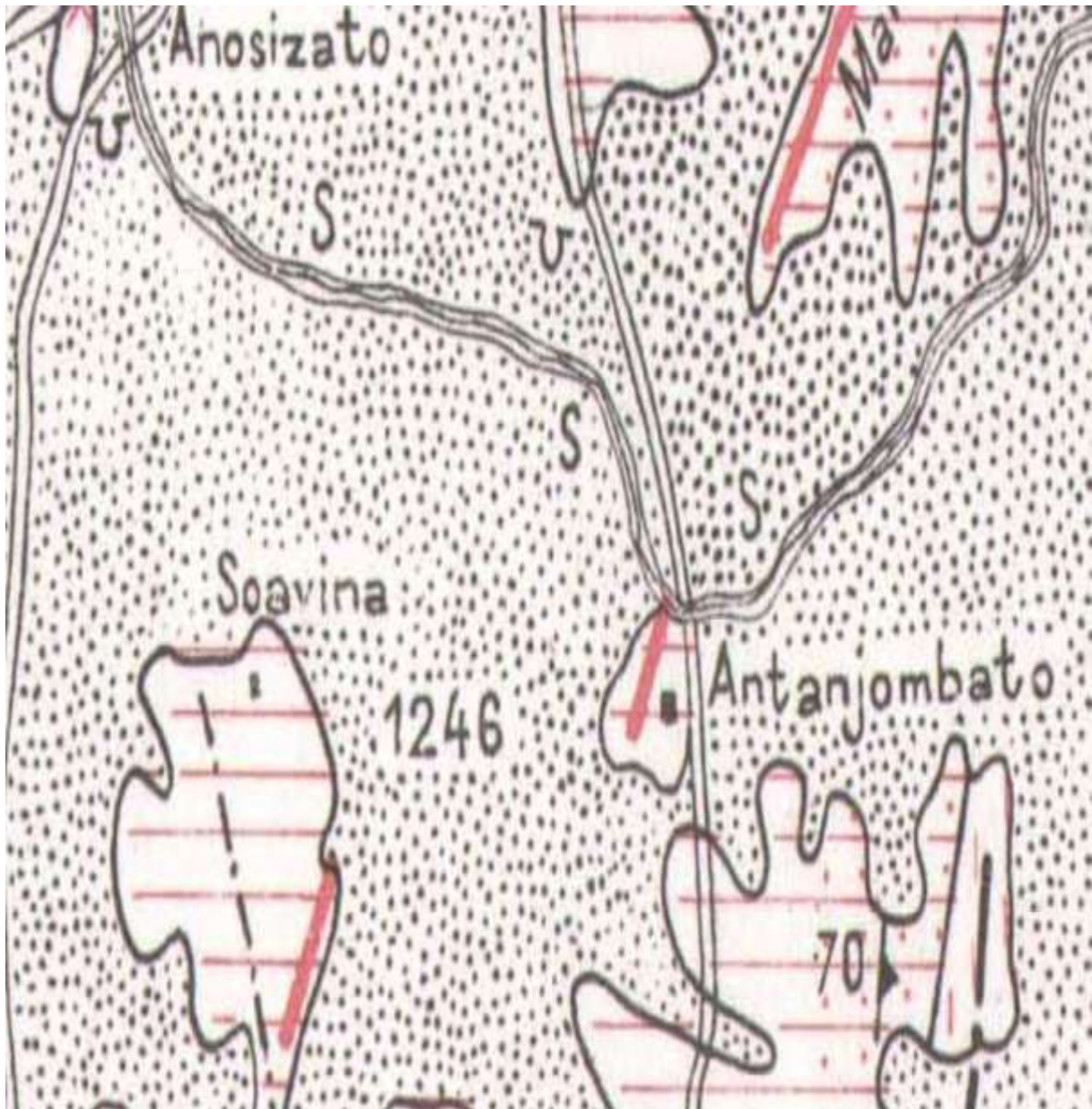


Figure 4: Carte Géologique de la Zone

I. 6. Missions de l'étude géotechnique

La mission de l'étude géotechnique consiste à :

- Procéder à des sondages de reconnaissance géologique et à des essais géotechniques, Interpréter les données des sondages et des essais.
- Donner les caractéristiques géologiques et géotechniques des différentes formations rencontrées.
- Définir le ou les systèmes de fondations adaptés aux sols et aux constructions.

- Signaler les éventuels problèmes d'exécutions des travaux liés à la nature du sous-sol.

I. 6 .1. Reconnaissance des sols

La reconnaissance de sols des travaux routiers est définie par l'ingénieur géotechnicien et elle doit suivre une certaine procédure permettant de définir avec précision :

- La position dans l'espace des divers éléments et formations constituant le sous-sol,
- L'identification géologique et physico-mécanique des sols soumis au champ de contraintes engendrées par la construction à l'intérieur du périmètre géotechnique de protection.

I. 6. 2. Conception de la plate-forme support de chaussée (PFSC)

La plate-forme support de chaussée (PFSC) est formée de bas en haut des 3 couches :

- la partie supérieure des terrassements (PST), elle est constituée de terre naturelle ou de remblai en cas d'insuffisance de niveau ;
- la couche de forme (CdF) ;
- la couche de fin réglage (CfR).

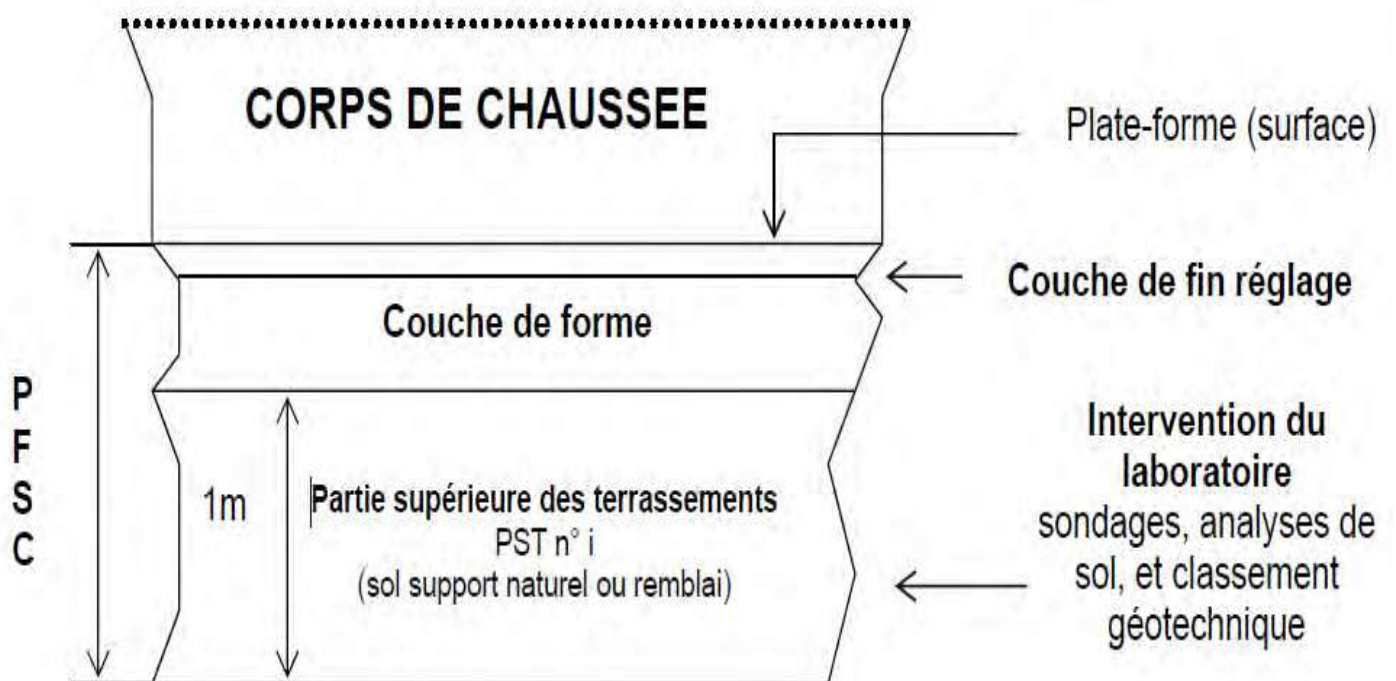
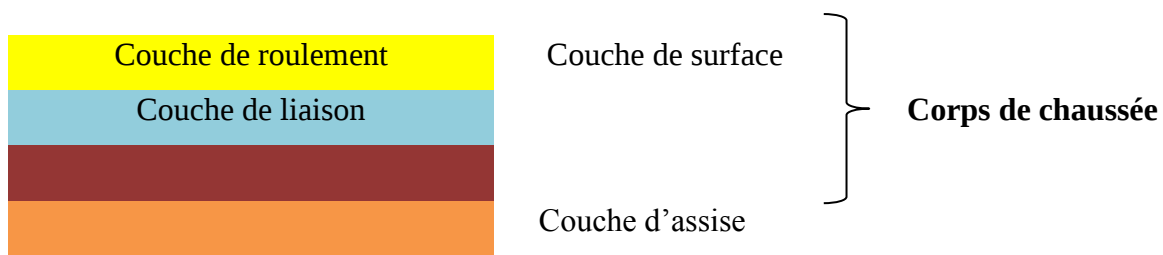


Figure 5: schéma de la structure de la plate-forme support de chaussée (pfsc)

La plate-forme (PF) doit répondre aux objectifs suivants :

- Garantir une portance (l'aptitude des couches sous-jacentes à résister aux contraintes et aux déformations appliquées par la circulation et transmises par l'intermédiaire des couches supérieures constituant le corps de chaussée) à court terme, supérieure à 50MPa, nécessaire à l'obtention de la qualité de compactage ou de densification des matériaux du corps de chaussée, mais également à long terme.
- Permettre la traficabilité nécessaire aux engins de chantier.
- Assurer la protection de la PST contre les intempéries lors du chantier de construction de la chaussée,

I. 6. 3. Conception du corps de chaussée



C'est dans ce corps de chaussée qu'on va utiliser les méthodes géotechniques pour la reconnaissance de la nature du sol, afin d'effectuer les travaux de réhabilitation.

Sur ce, notre travail consiste à la reconnaissance d'une plate-forme routière qui se trouve dans le district de Antananarivo Antsimondrano, en utilisant la technique de reconnaissance du sol naturel ; de ce fait, on utilise la technique de réhabilitation ; Cette technique consiste donc au fraisage et à la mise en décharge de l'ancienne chaussée puis à l'apport des matériaux élaborés.

I. 6. 4. Le classement géotechnique des sols naturels

Les sols en place sont des matériaux naturels, constitués d'éléments granulaires pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ainsi, la détermination de la classe géotechnique du sol en place, s'effectue

selon la norme NF P 11-300 à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur un prélèvement représentatif.

De ce dernier, on effectue l'essai sur site dans des conditions adéquates.

A partir de ce classement appelé communément GTR (Guide Technique Routier), on distingue quatre grandes classes géotechniques du sol naturel présentant des propriétés spécifiques ainsi que des comportements mécaniques et gélifs prévisibles dans le temps :

- **La classe A : les sols fins**

Cette classe contient quatre sous classes : A1, A2, A3, A4 ;

- **La classe B : les sols sableux et graveleux avec fines**

Cette classe contient six sous classes : B1, B2, B3, B4, B5, B6 ;

- **La classe C : les sols comportant des fines et des gros éléments**

Cette classe contient deux sous classes : C1, C2 qui s'associent pour la fraction 0/50mm aux classes A1, A2, A3, A4 ou B1, B2, B3, B4, B5, B6.

- **La classe D : les sols et roches insensibles à l'eau**

Cette classe contient trois sous classes : D1, D2, D3 ;

L'ensemble de ces matériaux se retrouve le plus souvent dans la réalisation d'une chaussée neuve ou d'un élargissement, notamment au niveau de la partie supérieure des terrassements (PST).

Cette classification géotechnique ainsi obtenue est basée essentiellement sur des conditions de réutilisation du sol naturel et repose sur des paramètres de nature, de comportement mécanique et d'état jugés représentatifs

I. 7. Caractéristique des travaux de reconnaissance du sol

Le sol est largement utilisé en construction de travaux publique(s), soit utilisé aux Platte- forme support, soit au corps de chaussée (couche de forme, couche de fondation, couche de base....)

Les caractéristiques du sol sont très variables, aussi bien dans le sens vertical qu'horizontal, ce qui nécessite des études de contraintes dans le terrain, le comportement du sol et éventuellement de l'utilisation de ce dernier.

I. 7. 1. Paramètres caractérisant la nature des sols :

Les paramètres suivants sont à considérer pour la reconnaissance :

- aspect, couleur, texture
- appellation suivant la classification normalisée ;
- granulométrie ;
- teneur en eau ;
- compacité ;
- poids spécifiques, apparents et absolus ;
- limites d'Atterberg ;
- états de fissuration, pendages ;

I. 7. 2. Paramètres caractérisant le comportement des sols naturel

Ces paramètres dépendent en partie du type de procédure et l'appareillage utilisé :

- Cohésion ;
- Angle de frottement ;
- Pression limite

Sur ce, le sol est composé de trois éléments : le grain solide, l'air et l'eau.

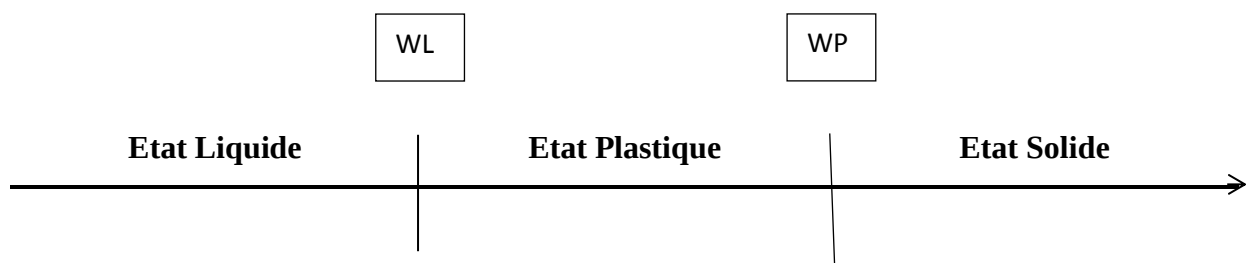
Air

Eau

Grain

Le grain solide est composé de trois phases : **liquide, plastique et solide**

On représentera comme suit le comportement du sol selon ces différentes phases.



CHAPITRE II

ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE

CHAPITRE II : ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE

II. 1. Objectifs de la reconnaissance

L'objectif de l'étude consiste à :

- Définir les spécificités et contraintes géotechniques du site d'étude en égard du projet,
- Fournir les informations nécessaires afin de définir le type et le mode de fondation ;
- Donner des suggestions et des recommandations d'exécution fondamentale et particulière.

L'identification des différents types de sol constituant le site est le seul moyen pour parvenir à ces objectifs.

II. 2. Organisation de la reconnaissance

La reconnaissance du sol commence par l'examen visuel des affleurements et des matériaux rencontrés dans le site (reconnaissance géologique), afin de mieux se renseigner sur les différentes campagnes d'investigation qu'il faut mener in situ.

On a donc réalisé, des sondages et des essais comme suit :

- 2 sondages à la tarière (Pr1 et Pr2) associés à la réalisation
- Des essais en laboratoire

II. 2. 1. Profondeur de reconnaissance :

La reconnaissance géotechnique est menée jusqu'à une profondeur qui dépend des dimensions en place de l'ouvrage, ainsi que de l'importance relative des contraintes appliquées au sol à différents niveaux, par rapport à celles dues à la gravité préexistante à ces mêmes niveaux.

Il est à noter qu'en général, dans un plan vertical, la zone d'influence en profondeur d'une fondation est de l'ordre de grandeur du double de sa dimension horizontale et de l'ordre de grandeur de la moitié de la moitié latéralement.

II. 2. 2. Mode de reconnaissance :

Les meilleures reconnaissances sont faites avec les puits, des galeries ou des tranchées.

On peut dans ce cas :

- Bien voir les terrains
- Prélever les gros échantillons ;
- Réaliser des in situ : des sondages

Généralement le problème rencontré ici c'est le coût élevé des investigations.

Dans la plupart des reconnaissances géotechniques, on procède à une reconnaissance par sondage mécanique. Le nombre de sondages est adapté aux dimensions de l'ouvrage d'une part et à la nature présumée des travaux de l'autre part. [3]

On peut en particulier limiter le nombre de sondage, lorsque la nature des couches de sol est nette et homogène et que les pentes sont faibles. Il ne faut jamais oublier que le premier sondage donne, bien que rarement, des résultats satisfaisants ; c'est avec lui que s'adaptent au terrain l'ouvrier et l'ingénieur spécialisé, indispensables pour la direction de ces travaux.

II. 2. 3. Choix d'un tracé routier :

Le choix d'un tracé routier s'effectue en fonction de nombreux critères: politique d'aménagement, économies, techniques, environnementaux...

Dans cet ensemble, les données géotechniques sont nécessaires, car elles seules permettent de garantir « la faisabilité » de l'ouvrage et d'en estimer le coût. Ces paramètres conditionnent le choix final.

En effet, la reconnaissance géotechnique :

- Fournit au projeteur les éléments nécessaires à la prise en compte correcte de l'aspect géologique, compte tenu des autres contraintes pour définir le meilleur tracé ;
- Recherche une solution aux problèmes géotechniques qui subsistent sur le tracé final ;
- Détermine la nature et l'état des sols pour prévoir leur condition d'utilisation et permettre l'établissement des mouvements des terres ;
- Conseille le maître d'œuvre pour la rédaction des marchés et en particulier des clauses du cahier des prescriptions techniques ;
- Donne aux sociétés soumissionnaires les éléments nécessaires pour le choix des méthodes et l'estimation des coûts ;
- Facilite la réalisation des travaux et leur contrôle

II. 3. Investigations préliminaires

Pour avoir un aperçu et une idée préalable du type de sol, certaines méthodes doivent passer en premier. Dans ce cas, il est très pratique et convenable de faire des sondages à la tarière ; ceux-ci surviennent dans l'immédiat.

II. 3. 1. Sondages à la tarière

Il faut tout d'abord savoir que le mot sondage et forage ne différencie que sur le domaine d'application. On utilise le mot sondage dans les phases d'exploration et de reconnaissance ou aussi dans les recherches, tandis que « forage » est la description du même procédé lors des phases d'exploitation ou de développement d'un projet.

a. Objectifs des sondages

On sait tous que les résultats obtenus lors des différents sondages géophysiques ne sont que des probabilités ; c'est pourquoi il faut faire des études supplémentaires. Les sondages à la tarière est l'une des procédés les plus simples et moins coûteux pour avoir des résultats fiables sur ce domaine [1].

b. Principe de fonctionnement

La classification des appareils de sondage est basée selon plusieurs critères : son mode d'action ou la nature de son mouvement (rotation ou battage), selon la façon dont ils remontent les débris à la surface (avec ou sans injection), selon la vitesse d'exécution et la puissance des appareils.

La tarière est classée avec ce dont on appelle forage à sec, sans injection, mais dont le mode d'action est un mouvement par rotation. Sa vitesse de rotation n'est que de quelques tours par minute due au fait qu'elle est exécutée manuellement. Elle peut réaliser un sondage d'une bonne vingtaine de mètres de profondeur.

Les matériels utilisés au sondage à la tarière sont :

- **La tarière** : c'est l'outil de perforation composé de filetage mâle, du méplat, d'un corps, et d'une pointe hélicoïdale.



Figure 6: Tarière

- **Un té** : vissé aux tiges pour permettre la rotation de l'ensemble.
- **Une clé à fourche** : pour les opérations de vissage.
- **Une tige de sondage** : élément de 0,60-0,90-1,50 ou 3,00m, sert à approfondir le trou, + 2 filetages mâle et femelle aux extrémités et 2 méplats. Leur fabrication permet une bonne manipulation et une bonne résistance à la rotation, poids : 1,5 à 2kg/m, $60 \leq d \leq 300\text{mm}$.
- **Une clé de retenue** : retienne l'ensemble des matériels se trouvant encore dans le trou.

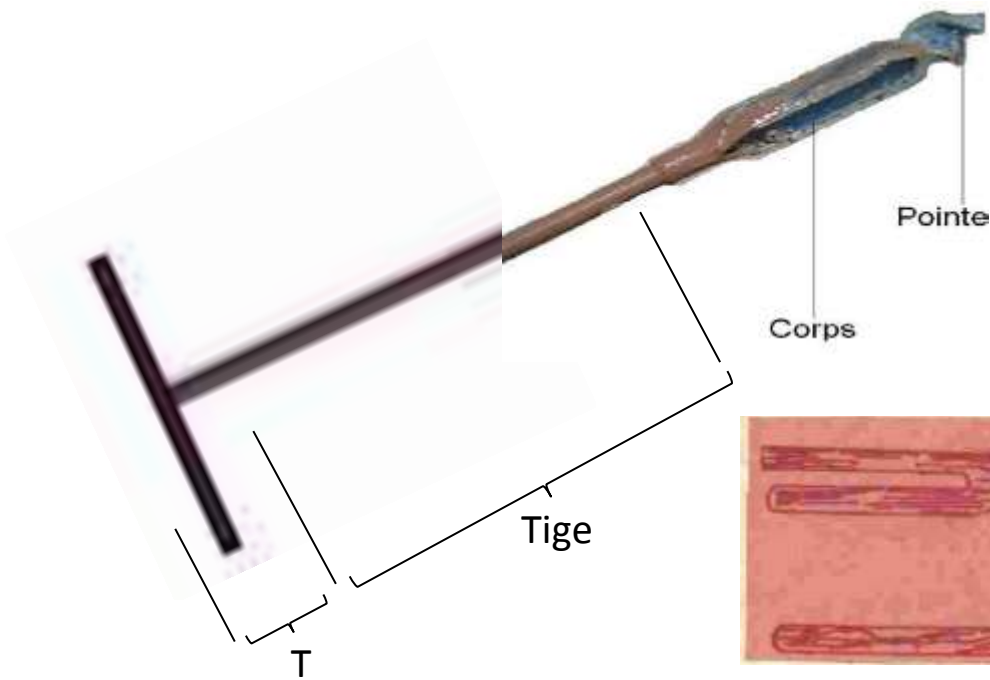


Figure 7: Accessoire de la tarière

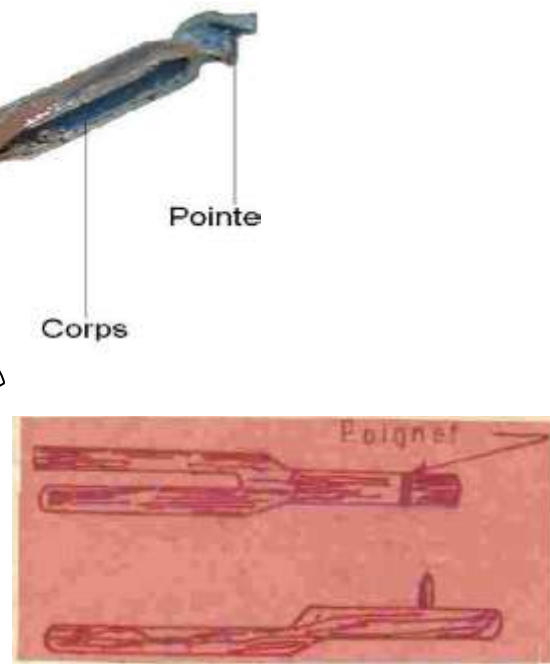


Figure 8: Clé de retenue

Pour un forage de plus de dizaine de mètres, les outils suivants sont nécessaires :

- **Chèvre** : permet de descendre et de remonter rapidement l'outil dans le forage
- **Treuil à main** : permet de soulever une masse de plus de 400kg à 1000kg.

c. Mode opératoire

On assemble les différentes parties constituant la tarière. Il ne suffit plus que de tourner le tout en appuyant un peu, afin que la pointe de la tarière (Figure 6) puisse s'enfoncer dans le sol. On retire le matériel du moment que le corps de la tarière soit plein d'échantillons ; on se rend compte de ceci lorsque qu'on a du mal à exécuter la manipulation. On récupère ensuite les échantillons, pour les essais en laboratoire, et on rajoute une tige à l'ensemble pour atteindre le niveau de profondeur plus bas. L'assemblage des matériaux devient plus compliquer à certaines profondeurs, et c'est là que la clé de retenue entre en jeu. Elle maintienne la partie des matériels se trouvant en profondeur tandis qu'on visse ou dévisse les éléments au-dessus.

Les résultats des sondages sont mentionnés dans la partie : résultats et interprétations (Chapitre IV).

Avantages : Cette technique est simple et ne nécessite pas trop d'entretien. La manipulation peut être assurée efficacement par deux ou trois hommes bien entraînés.

Inconvénients : Toutes les actions sont faites manuellement ; d'où une faible vitesse d'avancement et une profondeur de sondage limitée. 2m/poste de 8 heures

RMQ : Les roches meubles ont une cohésion et une plasticité plus ou moins fortes suivant leur teneur en eau. Ces roches ne présentent pas de problème de perforation mais plutôt un problème d'extraction et de tenue des parois de sondage [6].

CHAPITRE III

ESSAIS EN LABORATOIRE

CHAPITRE III : ESSAIS EN LABORATOIRE

L'étude géotechnique ne peut être complète que si une fois elle a passé en laboratoire. L'étude en laboratoire permet de confirmer la vraie nature des couches et de livrer d'autres paramètres physiques qu'on ne peut mesurer in situ. On peut diviser les essais en laboratoire en plusieurs parties selon leurs objectifs (domaine d'application). Suivant les normes AFNOR, il y a les essais d'identification et de classification de sol, les essais de compactage, les essais de portance...

Dans notre cas, seuls les essais d'identification et l'essai de compactage nous intéressent.

III. 1. PREPARATION D'ECHANTILLONNAGE :

L'échantillonnage est effectué par le procédé de quartage qui est la méthode manuelle de prendre l'échantillon pour réaliser l'essai. On partage en quatre parts égales l'échantillon bien mélangé pris sur le terrain ; on assemble les deux quarts opposés (1 et 3) qui deviendra l'échantillon 2 et on applique le quartage sur ce dernier encore une fois jusqu'à en avoir la masse voulue pour pratiquer l'essai.

Echantillonnage

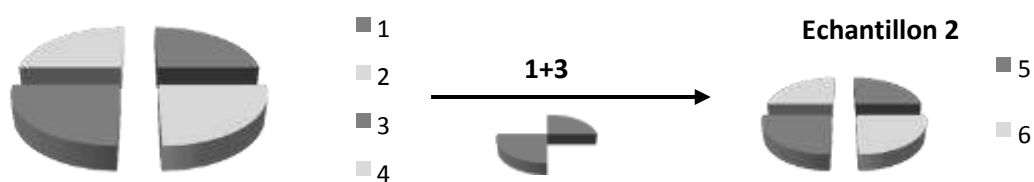


Figure 9 : prise d'échantillonnage

III. 2. ESSAI D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DU SOL

Pour commencer, les essais d'identification sont divisés dans chaque famille d'essai en salle.

- ✓ **Teneur en eau ;**
- ✓ **Granulométrie par tamisage ;**
- ✓ **Les limites d'Atterberg;**
- ✓ **Essai de portance CBR;**

III. 2. 1. Teneur en eau NF P94-050:

a-Définition.

La Teneur en eau naturelle (W_n) est un paramètre d'état qui permet d'apprécier la consistance d'un sol fin. La teneur en eau pondérale est le rapport d'évaporation masse d'eau par l'étuvage sur la masse des grains de sous exprimée en pourcentage.

La teneur en eau naturelle d'un matériau est la teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur le site ; le transport et la conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

b- Principe:

La perte d'eau d'un échantillon de matériaux est provoquée par étuvage, les masses d'échantillons de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

c- Appareillage :

Les appareils utilisés pour le bon déroulement de l'essai sont :

- Enceinte thermique ou étuve réglable à 50°C et 105°C
- Balance d'exactitude de 1/1000 pour les masses de matériaux pesés
- Coupelle, boîte de pétri ou vase non altérable à la chaleur et l'humidité pour le pesage et séchage de l'échantillon
- Un dessiccateur

d-Conduite de l'essai :

Pour déterminer la teneur en eau d'un matériau, les étapes utilisées sont:

- ✓ Prélever un échantillon.
- ✓ Peser la boîte pétrie (p1).
- ✓ Prélever un échantillon.
- ✓ Placer l'échantillon sur la boîte de pétri.
- ✓ Peser l'échantillon avec la boîte de pétri (p2).
- ✓ Mettre à l'étuve à 60°C c à 105°C jusqu' à dessiccation et poids stable (environ 24 h).
- ✓ Peser l'échantillon sec avec la boîte de pétri après la sortie de l'étuve (p3)

L'échantillon de matériau conservé dans les conditions naturelles et conservé dans un étui est pesé (M_h), puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est à nouveau pesé (M_s).

Le temps de séchage est au
minimum : - 4h

Dans le cas d'un étuvage à
105°C ; - 8h

Dans le cas d'un étuvage à
50°C.

La teneur en eau est déterminée par la formule :

$$w(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

W est exprimé en pourcent

III. 2. 2. Granulométrie par tamisage**a- Définition:**

La granulométrie est, selon la norme AFNOR, une opération aboutissant à la séparation selon la grosseur des éléments constituant d'un échantillon [4]. L'analyse granulométrique est un des essais permettant de nommer un sol et de le classer rapidement.

On procède par tamisage pour les échantillons avec des grains de diamètre supérieurs à 0.08mm= 80µm, et par sédimentométrie pour ceux avec des grains fins inférieurs 80µm.

La sédimentométrie est basée sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux. L'analyse granulométrique se traduit par la courbe granulométrique, cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés

III. 2. 2. 1. Granulométrie

a-Principe et appareillage

La séparation des éléments constituant de l'échantillon se fait par des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Les résultats obtenus seront présentés sur une fiche d'essai et ensuite représentés sous forme de graphe qui est la « courbe granulométrique ».

On utilise évidemment une série de tamis où les ouvertures de tamis seront déterminés en fonction des dimensions des grains et de la précision attendue.

Les matériels utilisés sont, donc :

- Des tamis à mailles carrées : pour le tamisage
- Un dispositif de lavage ou un bac de lavage
- Une balance de précision
- Une étuve
- Des brosses et des cuvettes.
- Un tamiseur automatique



Figure 10:Tamis

b. Mode opératoire

Pour effectuer un bon essai il faut suivre certaines étapes

❖ ***Échantillonnage :***

Il s'agit de déterminer la masse de l'échantillon nécessaire pour l'essai. Sa valeur doit être comprise entre 300D et 500D (300 à 500 fois le diamètre maximal des grains)

NB : Le diamètre sera représenté en millimètre et la masse de l'échantillon en gramme

❖ ***Trempe et lavage de l'échantillon***

Pour mieux séparer les grains constituants de l'échantillon, il est nécessaire de l'imbiber dans de l'eau froide pendant 12 heures au minimum. L'opération de lavage élimine les grains fins de diamètre inférieur à 0.08 mm. Il se termine lorsque l'eau s'écoulant sous le tamis de lavage est assez claire.

❖ ***Séchage***

L'échantillon lavé sera introduit dans une étuve à une température de 105°C dans le but d'éliminer complètement l'eau dans l'échantillon afin de faciliter l'étude de la granularité du sol.

❖ ***Tamissage et Pesage :***

Avant le tamissage, on pèse l'échantillon sec.

Le tamissage se fait par ordre décroissant des tamis.

On introduit l'échantillon dans le tamiseur et on le fait agiter 4 à 5 mn, ensuite on pèse le refus cumulé sur chaque tamis, et on récupère le tamisât. NB : on prélève les résultats obtenus sur une fiche d'essai.

❖ ***Mode de calcul :***

On utilise les données prélevées sur la fiche d'essai, afin de calculer les pourcentages des refus cumulés et des tamisages cumulés.

$$\% \text{ Refus cumulé} = \frac{R_i}{M_s} \times 100$$

$$\% \text{ Tamisât cumulé} = 100 - \left(\frac{R_i}{M_s} \times 100 \right) = 100 - \% \text{ Refus cumulé}$$

REMARQUE :

« R_i » est ici la masse du refus cumulé de l'échantillon en gramme prise lors du pesage. Cette masse est variable selon les résultats de pesage recueillis. « M_s » est la masse sèche de l'échantillon.

Après les calculs, il faut tracer la courbe granulométrique qui présente les pourcentages de tamisât cumulé en fonction des ouvertures de tamis



Photos 1 : Refus dans les différents tamis

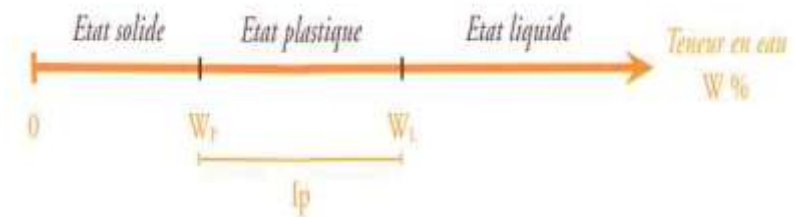
III. 2. 3. Essai d'Atterberg NF P 94-051

a-définition

- La limite d'atterberg ou limite de liquidité et de limite de plasticité est l'étude d'état particulier d'un sol qui correspond à l'état pondéral de la teneur en eau.
- La limite de liquidité est la teneur en eau remaniée entre l'état liquide et l'état plastique.
- La limite de plasticité est la teneur en eau remaniée entre l'état plastique et l'état solide.
- Caractériser « l'argilosité » d'un sol
- L'indice de plasticité est la différence entre la limite de liquidité et de plasticité, avec la formule

Expression des résultats

- limite de liquidité W_L (%)
- limite de plasticité W_p (%)
- indice de plasticité $I_p = W_L - W_p$



$$I_p = W_l - W_p$$

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité du sol.

Indice de plasticité IP	Degré de plasticité
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau n° 1: Degré de plasticité

Les limites d'Atterberg permettent en particulier de classer les sols suivant un diagramme de plasticité.

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de consistance qui caractérise l'état hydrique d'un sol

L'indice de consistance : ce gradeur caractérise l'aptitude du sol à supporter des charges (l'état hydrique d'un sol)

$$I_C = (W_L - W) / I_P$$

b-Principe:

En principe, l'essai de la limite d'Atterberg se fait en deux phases. D'abord, l'essai de la limite de liquidité par l'appareil de casa grande consiste à faire subir l'échantillon à série de plusieurs choc sur la coupelle après avoir rayé échantillon étalé sur la coupelle .Ensuite, la collection du rouleau de sol manuellement jusqu'à la fissuration de sol.

c-Appareillage :

Tous les outils à utiliser pour cet essai doivent être suivis à la lettre selon la norme indiquée

- L'appareil de casa grande et outil de rayure
- Etuve de dessiccation
- Balance
- Capsule ou boîte de pétri, spatule, truelle
- Matériel pour la détermination de la limite de plasticité



Photos 2:Appareil Casa grande pour limite d'Atterberg

d.Mode opératoire et exemple de résultat:

-Préparer le sol d'essai en imbibant le sol d'eau à température ambiante au moins 24h pour l'expression de la masse dans laquelle ceci doit être supérieur à 200 Ibis la plus grande dimension vue apparent Elle doit être passante de 400un qui donne au moins 200g.

-Une fois imbibé 11 doit être tamisé par le tamis indiqué ci-dessus en laissant se décanter au moins 12h sans aucun additif ou d'autre appareil de décantation. Après décantation, il faut siphonner sans toucher le ton pour en écher $r\&ha1bn$ et étuver le reste afin d'évaporer l'eau à 50°C. Ensuite, il faut contrôler les appareils à utiliser puis il faut malaxer l'échantillon afin de le rendre homogène et le rendre presque fluide. Il faut passer à la première phase édictée par le principe qui peut être définie par les figures ci-après:

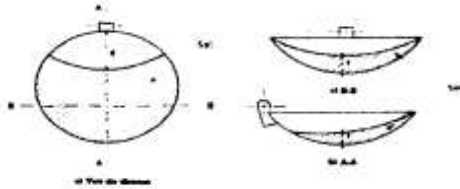


Figure 12: Remplissage de la coupelle

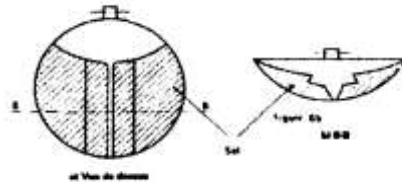


Figure 11: Traçage de la rainure

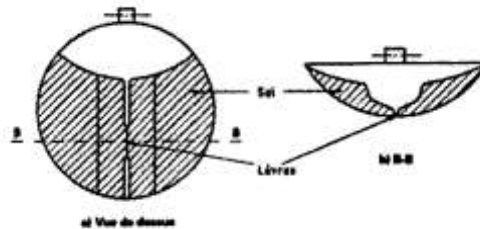


Figure 13: Fermeture de la rainure

❖ Limite de liquidité :

La limite de liquidité d'un matériau (W_L) est définie comme la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique et à laquelle la rainure se referme sur 1cm après 25 coups.

Pour déterminer la limite de liquidité, on utilise la coupole de Casagrande, qui consiste en un appareillage composé d'un bol et d'un arbre à came permettant de transformer le mouvement de rotation en translation, on arrive donc à élever le bol d'une certaine hauteur et de le laisser retomber sur un plan rigide.

✓ Appareillage

L'appareillage est distingué suivant la limite à déterminer sans oublier le matériel de préparation.

-Matériels pour la préparation de l'échantillon:

- Un récipient d'au moins 2 l pour tremper la prise d'essai;

- Un gobelet;
- Un tamis à maille carré de 400 μm

-Matériels pour la détermination de limite de liquidité W_L

- Un appareil de Casagrande dont sa coupelle peut être lisse ou rugueuse
- Un outil à rainurer;
- Une cale de 10 mm d'épaisseur pour régler la hauteur de chute de la coupelle.
- Une étuve
- Une balance de précision de dixième près

✓ Exécution de l'essai

Pour réaliser ce premier test, il faut :

- Humidifier l'échantillon de sol fin
- L'homogénéiser
- Etaler l'échantillon dans le bol, de manière à avoir une épaisseur à peu près constante, de 1 [cm], avec une surface horizontale
- Appliquer une rainure au milieu, séparant l'échantillon en deux parties distinctes et égales, de manière à voir le fond du bol
- Tourner la manivelle en comptant le nombre de fois que le bol s'est élevé puis rabattu jusqu'à ce que la fente se referme à 1 cm.
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau. On répète 3 fois l'essai avec une teneur en eau dont le nombre de coups doit être compris entre 15 et 32.

❖ Limite de plasticité :

La limite de plasticité (W_P) est définie comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges.

Matériels pour la détermination la limite de plasticité W_P

- Une plaque lisse en marbre ou en verre pour confectionner les boulettes
- Des boîtes de pétri
- Une étuve
- Une balance de précision de dixième de près

Pour déterminer cette limite, le procédé est le suivant :

- Prendre un échantillon séché du sol fin
- Y ajouter un peu d'eau et homogénéiser le mélange
- Former trois fils de 3 [mm] de diamètre et de 10 [cm] de longueur sur le modèle d'une petite barre de fer
- Rouler les fils sur une planche de bois, servant à l'assécher au fur et à mesure, jusqu'à
- L'apparition des premières fissures. Les rétrécir si nécessaire pour maintenir la même longueur (10 [cm])
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.

III.2.4. ESSAI DE COMPACTAGE : « PROCTOR MODIFIE » _ NFP 94-093

a-Définition

Le compactage est l'ensemble des mesures prises pour augmenter la densité apparente sèche du sol traité. Ce qui conduit à réduire son volume apparent (par diminution de l'indice des vides).

Elle est recherchée parce qu'elle entraîne d'autres conséquences : la limitation des tassements, la diminution de la perméabilité, l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol

b-But et principe de l'essai PROCTOR

L'essai de compactage des matériaux est déterminé à partir des essais appelés : Essai Proctor Normale ou Essai Proctor modifié. Leur seule différence se trouve dans les valeurs de paramètres définissant l'énergie de compactage.

Le principe de l'essai consiste, en générale, à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter ensuite. Le compactage est procédé différemment pour chaque valeur de teneur en eau. A chacune de ces valeurs, on détermine la masse volumique sèche correspondant du matériau pour aboutir à la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

L'essai Proctor est donc un essai qui a pour but de déterminer la teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximale d'un sol pour une énergie de compactage donnée. Ces données seront utilisées afin de déterminer les paramètres de meilleur compactage possible sur le terrain.

c. Matériels utilisés

- Moules ;
- Dame Proctor modifié (de masse $4535\text{g} \pm 5\text{g}$) ;
- Règles à araser
- Balance de précision ;
- Pelles et éprouvettes graduées ;



Figure 14: Moules et Dames Proctor

d. Préparation de l'échantillon

L'échantillon est pris lors de l'opération de quartage énoncé précédemment. Dans le cas où ce dernier est sec, on l'humidifie avec une teneur en eau largement inférieure à la teneur en eau optimale prévue, dans le cas contraire, on la sèche à l'air. On réduit la granularité du matériau jusqu'à 20 mm environ à l'aide d'un maillet puis on mélange le tout afin d'obtenir un échantillon homogène.

e. Mode opératoire

La procédure de compactage suit la modalité indiquée dans le tableau ci-après,

Nature de l'essai	Caractéristique de l'essai	Module Proctor	Module CBR	Schémas récapitulatif
Essai Proctor modifié	Masse de la dame Diamètre du mouton Hauteur de chute Nombre de couches Nombres de coups par couche	4535g 51mm 457mm 5 25	4535g 51mm 457mm 5 56	5 couches, à raison de: 25 coups par couche  Moule Proctor  Dame 56 coups par couche  Moule CBR

Tableau n° 2: Module de compactage PROCTOR

Préparation de l'échantillon : quatre ou cinq échantillons de teneur en eau différents l'un de l'autre de 2% à 3% ;

- Peser les moules avec son embase qui doivent contenir les échantillons ;
- Compacter l'échantillon suivant la modalité prescrit ci-dessus (n'oublier pas de scarifier la surface de chaque couche compacter afin d'assurer l'adhérence entre ces dernières) ;
- En lever la hausse et raser les 1cm qui dépassent ;
- Peser les échantillons compacter dans leurs moules ;
- Peser 2 prélèvements pour chaque échantillon ;
- Sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 heures ;
- Prendre la teneur en eau.

- **Expression du résultat**

Comme il avait été dit : notre but est de trouver la teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximal du sol.

*** La teneur en eau se calcul par la formule :**

$$W\% = \frac{(P_h - P_s)100}{P_h} \text{ où}$$

Ph : poids du sol après compactage et

Ps : poids du sol après étuvage.

*** Le poids volumique sec se détermine par la relation :**

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + W\%} \text{ avec } \gamma_h = \frac{P_h}{V} \text{ où}$$

Ph : poids du matériau (« Poids moule + poids matériau » - « poids du moule »).

La teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximal se déterminent graphiquement.

*** L'Énergie de compactage** (exprimée en kNm/m³)

$$= \frac{N.H.m.g}{V} \text{ où}$$

Avec :

N : nombre total de coups ;

H : hauteur de chute de la dame ;

m : masse de la dame ;

g : accélération de la pesanteur ;

V : volume du matériau compacté dans le moule

III.2.5. ESSAI DE PORTANCE : « CBR, Le California Bearing Ratio »

Le California Bearing Ratio (CBR) est un essai dont l'objectif est de calculer la résistance au poinçonnement des sols. L'indice portant CBR est le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans un matériau type d'autre part. Elle s'exprimant, en pourcentage.

NORME NF P 94-078 : Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat -	Moule CBR complet avec surcharge  Presse CBR Anneau dyn. 60 KN Cadence mètre Anneau dyn. 30 KN (si presse manuelle)	Indice CBR immédiat : CBR 0j Indice CBR après immersion : CBR 4j Gonflement : g en %
--	--	---

a) But et Principe de l'essai

Après la détermination de l'essai Proctor, on a pu déterminer la teneur en eau optimale qui nous donne la teneur en eau de compactage pendant l'exécution de cet essai. Le CBR est un essai de poinçonnement réalisé dans des conditions bien définies sur des échantillons moulés et compactés suivant la méthode Proctor.

b) Matériels utilisés

Les appareils utilisés pour l'essai sont:

- Des moules CBR
- Une dame Proctor modifiée
- Une presse CBR
- Un comparateur à 1/100 mm de 10 mm de course pour mesurer le gonflement
- Un bac d'immersion qui doit avoir des dimensions suffisantes pour assurer l'immersion complète de la moule.
- Des disques de gonflement

c) Prise d'échantillon

Pour l'exécution de l'essai CBR, il faut avoir au moins 6000g conservé depuis de l'essai Proctor. La prise d'échantillon suppose que la granularité soit inférieure à 20 mm et le prélèvement, dont la disposition sera homogénéisée par brassage en tenant compte de la méthode de prise d'essai par quartage ou au moyen d'un échantillonneur.

d) Mode opératoire

Après avoir eu l'essai Proctor, on détermine l'essai CBR. On a utilisé 2 essais dont 1 énergie à 0 jour d'imbibition et 1 énergie à 4 jours d'imbibition. Mais normalement on utilise 6 essais dont 3 à zéro jour et 3 à 96H d'imbibition. On effectue 25 coups correspond à l'indice de compacité $IC \geq 95\%$ OPM normalisé. Faire le compactage du matériau en tenant compte à la teneur en eau optimale obtenu pendant l'essai Proctor. Après compactage, on va procéder au mesure de poinçonnement immédiat c'est le CBR à 0 jour et on doit mesurer aussi le poinçonnement à 4 jours d'imbibition. Voir le détail de ces deux types.

- **Le CBR immédiat ou CBR à 0 jour :**

Le CBR à 0 jour, ont procédé à l'exécution de poinçonnement avec la presse CBR, les étapes à suivre sont les suivantes :

- Avant d'effectuer le poinçonnement, il est nécessaire de peser l'échantillon après immersion pour déterminer sa teneur en eau.
- Mettre la moule sur la plaque de base et centrer le moule sur le piston.
- Faire le poinçonnement ainsi que la lecture inscrit sur le manomètre suivant

L'enfoncement inscrit sur la fiche d'essai qui nous donne la courbe effort déformation.

- **Le CBR après 4 jours d'imbibition ou d'immersion :**

Le CBR à 4 jours d'immersion a besoin de mettre le moule dans un bac appelé bac d'immersion après compactage pendant 4 jours, cette étape d'immersion a pour objet de déterminer le gonflement donc il est nécessaire de mettre un comparateur pour relever cette valeur de gonflement sur le moule.

Après le relèvement du gonflement, on peut exécuter le poinçonnement suivant l'étape indiqué précédemment pour obtenir le CBR immersion à partir de là on détermine l'indice de portance

e) Expression du résultat

L'indice portant CBR est donné par la formule :

$$\text{Indice Portant CBR à 2,5 mm} = \frac{F(2,5)}{1351} \times 100$$

$$\text{Indice Portant CBR à 5 mm} = \frac{F(5)}{2026} \times 100$$

On multiplie la force(F) par 100 ; 20 ou 2 selon l'utilisation de l'ânon.

Donc on détermine l'indice portance selon la plus grande valeur

CHAPITRE VI:
RESULTATS
ET
INTERPRETATIONS

CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Ce chapitre est la base de notre étude, concernant la présentation des résultats suivis des interprétations pour la classification du sol. Sur ce, on doit se baser surtout aux résultats de l'essai en laboratoire. Pour le prélèvement de l'échantillon à main la tarière était la méthode simple moins couteuse, il convient de présenter ce sondage à la tarière.

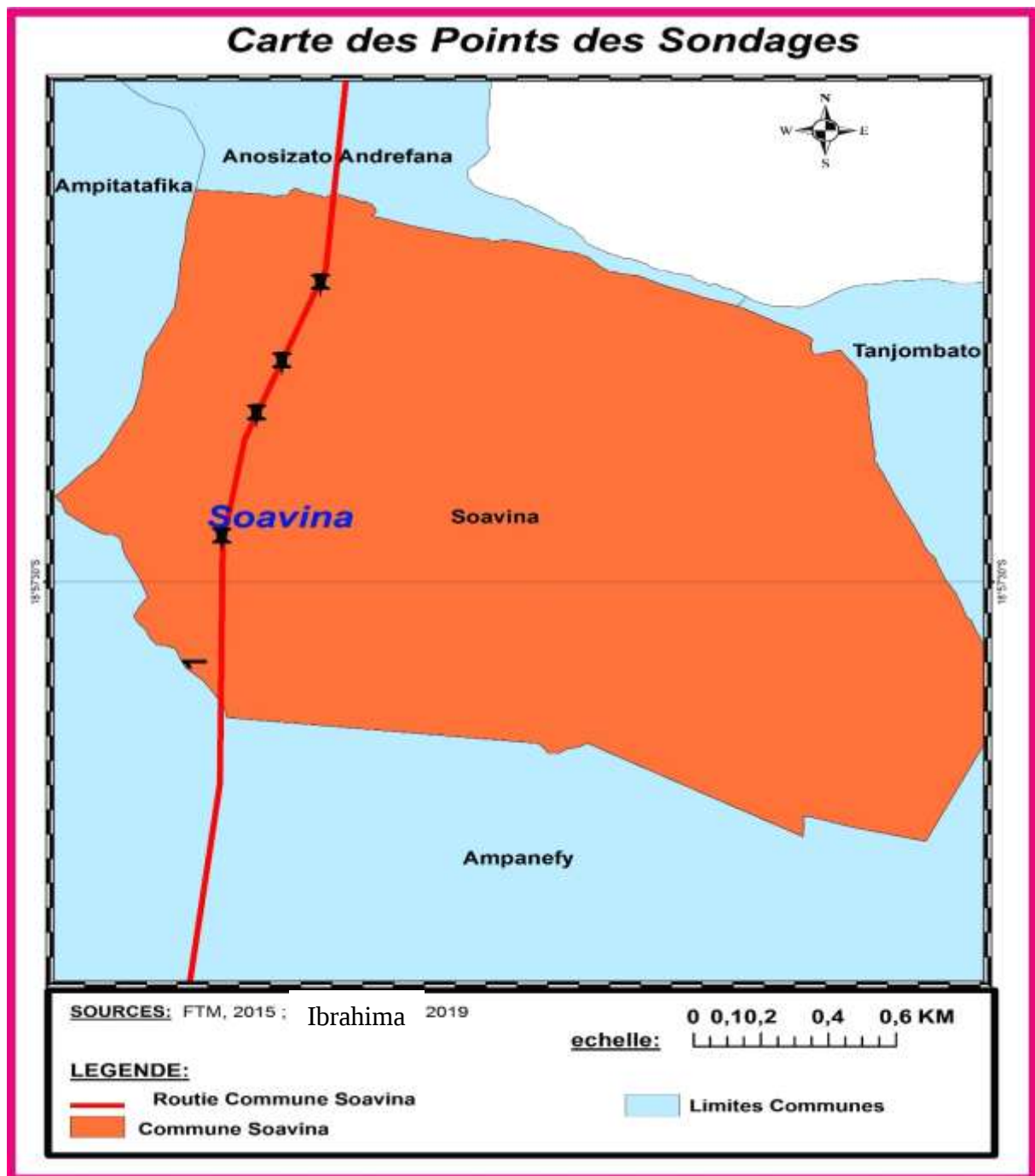


Figure 15 : Point de sondage de la zone

IV. 1. Sondage à la tarière

Deux sondages à la tarière ont été étudiés.

Ils ont été respectivement poursuivis aux profondeurs suivantes par rapport à la surface de la plateforme

Pr1 : 0.00 à 0.20 m : Argile Limoneux Brunâtre.

0.20 à 0.40 m : Argile Sableux fin micacée et grisâtre.

0.40 à 0.50 m : Argile tourbeuse noirâtre.

Pr52 : 0.00 à 0.20 m : Tourbeuse végétale

0.20 à 0,35m : Argile Limoneux Brunâtre.

0.35 à 0.45 m : Argile Tourbeuse Grisâtre.

0.45 à 0,50 m : Argile Grisâtre et peu de sable

IV. 2. RESULTATS DU LABORATOIRE

IV. 2. 1. Résultats de l'essai teneur en eau naturelle W%:

Feuille de mesure de la teneur en eau naturelle

Echantillon PK	32+850	
N° DE LA TARE	3	3
POIDS DE LA TARE (1)	52,9178	52,9178
POIDS TOTAL HUMIDE (2)	= poids du matériau humide + tare	88,5421
POIDS TOTAL SEC (3)	= poids du matériau sec + tare	84,5401
POIDS D'EAU (4)	= poids total hum – poids total sec	4,002
POIDS DU MATERIAU SEC (5)	=poids total sec – poids tare	31,6223
TENEUR EN EAU EN%	= (4) / (5) × 100	12,6
TENEUR EN EAU MOYENE	2, 3%	

Tableau n° 3: Feuille de mesure de la Teneur en eau naturelle

P : poids

Pe : poids de l'échantillon

Ph : poids humide de l'échantillon

Ps : poids sec de l'échantillon

W% : teneur en eau (en %)

❖ RESULTATS

SONDAGE	1	2	3	4
PK	1+050	20+675	32+850	54+153
Nature apparente des sols	Argile limoneuse grisâtre	Limon Argileux Rougeâtre	Argile limoneuse grisâtre + nodule	Argile limoneuse grisâtre + grains
Teneur en eau	4,4	4,8	12,6	6
teneur en M.O(%)	1,8	0,7	2,3	2,2

Tableau n° 4 : des résultats de la teneur en eau naturelle

La teneur en eau trouvée nous permet de déterminer l'indice de Consistance (IC) afin de connaître l'état Hydrique du sol nature.

IV.2.2.Granulométrie et Poids spécifique (ρ_s)

Echantillon PR1					
Profondeur (m)	Dmax (mm)	Elts< 2mm	Elts< 80 μ m	Elts< 2 μ m	$\rho_s(T/m^3)$
0.00/1.00	1.25	98	49	51	2.35
1.00/2.15	2	95	52	59	2.49
2.15/2.40	0.8	99	83	56	2.42
2.40/3.40	0.8	98	77	121	1.77
3.40/4.15	0.5	99	82	106	1.37
4.15/4.30	-	-	-	-	-
4.30/5.50	1	99	77	19	1.96
5.50/7.50	1.25	96	59	24	2.34
7.50/8.50	1.25	98	61	31	2.3
8.50/12.50	1.6	97	38	12	2.25
Echantillon PR2					
Profondeur (m)	Dmax (mm)	Elts< 2mm	Elts< 80 μ m	Elts< 20 μ m	$\rho_s (T/m^3)$
0.00/1.20	1.25	98	47	19	2.44
1.20/2.20	2	95	38	22	2.39
2.20/3.20	1	99	85	35	1.02
3.20/4.00	1.4	99	80	21	1.04
4.00/4.80	2	96	46	17	2.45
4.80/6.60	-	-	-	-	2.39
6.60/7.60	1.25	98	55	40	2.47
7.60/8.60	1.25	96	47	35	2.39
8.60/11.00	1.25	99	34	28	2.37

Tableau n° 5: Résultats de la granulométrie et des poids spécifiques

Pour la granulométrie, les valeurs affichées correspondent aux pourcentages des éléments passés à travers les mailles de tamis indiqués : 2mm, 80 μ m et 20 μ m.

Dmax correspond au diamètre maximal des grains dans chaque échantillon.

Les cases qui n'ont pas de valeurs sont ainsi, en raison de manque d'échantillon correspondant à la profondeur considérée.

IV. 2. 3. Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg

IV. 2. 3. 1. Limite de liquidité

Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg (Limite de liquidité)

Echantillon n°	A	B	C
Poids de la tare	18,50	15,00	18,50
Poids du sol humide + tare	27,00	29,00	28,00
Poids du sol sec + tare	24,50	24,50	25,00
Poids d'eau	2,50	4,50	3,00
Poids du sol sec - tare	5,00	9,50	6,50
Nombre de coups	13	25	31
Humidité	50,0	47,4	46,2
Limite Liquidité		46,4%	

Tableau n° 6 : Fiche d'essai de la limite de liquidité

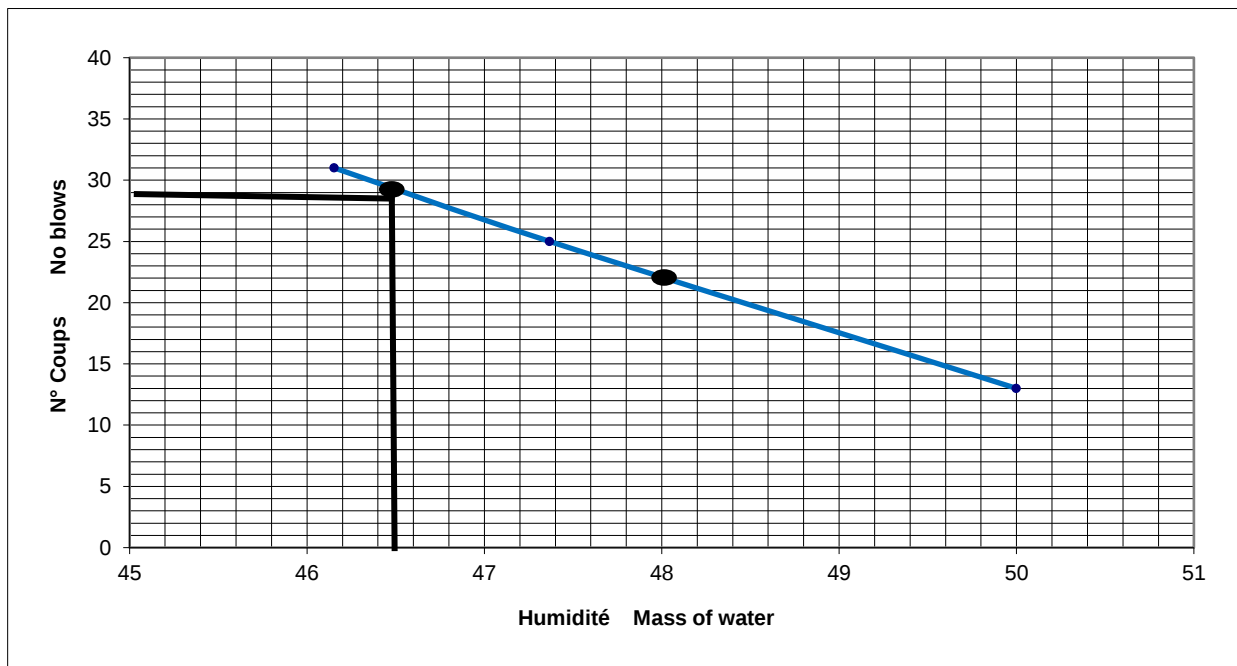


Figure 16: Résultat de la limite de liquidité (WL)

❖ INTERPRETATION

D'après le résultat obtenu de la limite de liquidité et diagramme, on peut conclure que la teneur en eau au-dessous de laquelle le sol cesse d'avoir la consistance d'un liquide est **moyenne** car il est compris de 25 à 50.

IV. 2. 3. 2. Limite de plasticité

Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg (Limite de plasticité) cas PK 1+050

Echantillon n°	A	B
Poids de la tare	16,62	14,56
Poids du sol humide + tare	17,80	15,56
Poids du sol sec + tare	17,56	15,35
Poids d'eau	0,24	0,21
Poids du sol sec - tare	0,94	0,79
Humidité	25,5	26,6
Limite de plasticité	26.0%	

Tableau n° 7 : Fiche d'essai de la limite de plasticité

La limite de plasticité **WP=26%** qui est la teneur en eau au-dessous de laquelle le sol cesse d'être plastique.

❖ Résultats pour les quatre PK

PK			1+050	20+675	32+850	54+153
Nature apparente des sols			Argile limoneuse grisâtre	Limon Argileux Rougeâtre	Argile limoneuse grisâtre + nodule	Argile limoneuse grisâtre + grains
identification	Atterberg	Wl (%)	46	39	46	38
		Wp (%)	26	24	24	24
		Ip %	20	15	22	14
		Ic	2.08	2.28	1.52	2.29

Tableau n° 8 : synthèse des résultats de la limite d'Atterberg sur les quatre PK

La limite de plasticité WP est la moyenne obtenue par deux valeurs.

La limite de liquidité WL, obtenue via l'extrapolation de la droite intrinsèque formée par quatre valeurs mesurées.

Pour déterminer l'indice de Consistance (Ic), qui est la valeur relative de la teneur en eau du sol dans la plage de plasticité on a :

$$Ic = \frac{Wl - Wn}{IP}$$

Avec : Wl = indice de liquidité
 Wn = teneur en eau naturelle
 IP = indice de plasticité

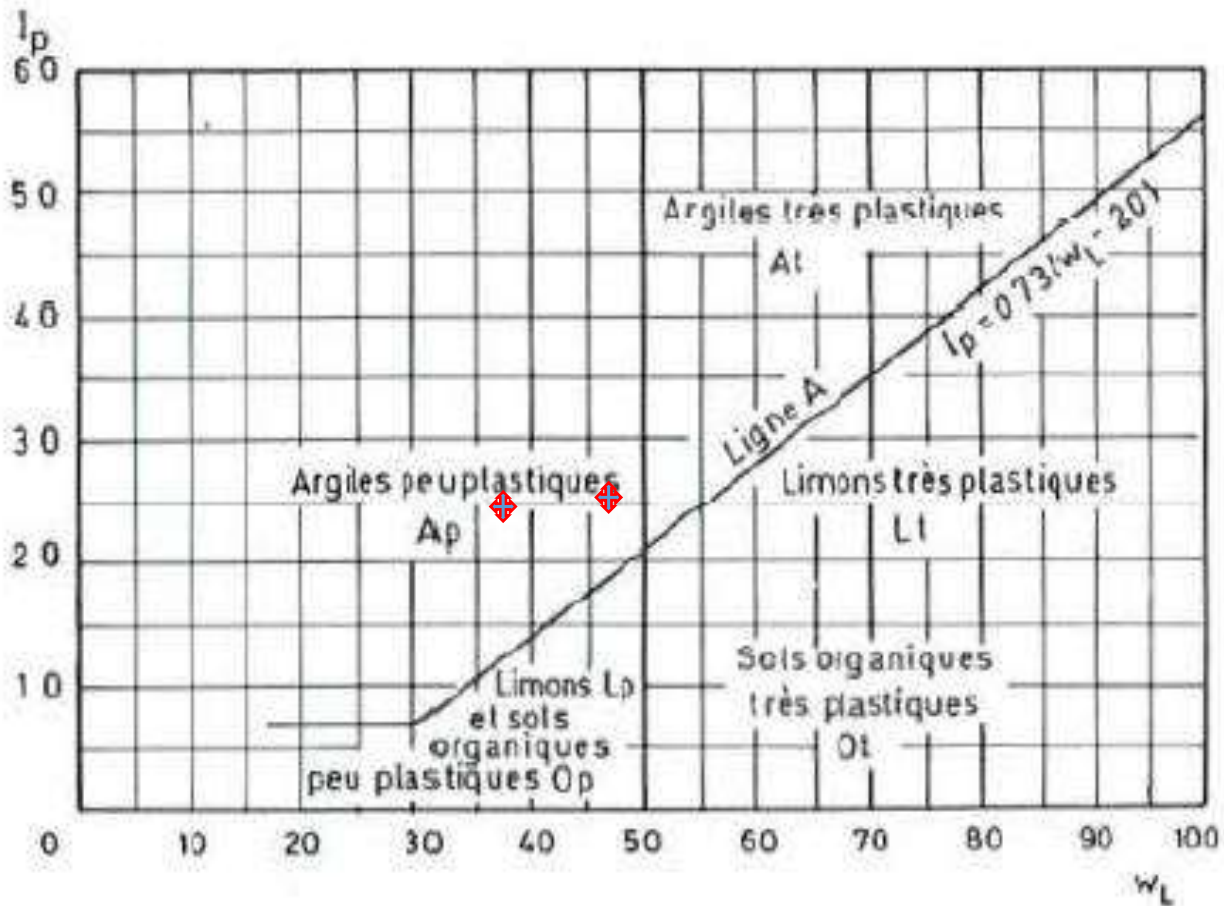


Figure 17. Diagramme Casagrande de plasticité et classification des sols fins
D'après le diagramme de Casagrande de plasticité et classification des sols fins on a :

Un sol argileux peu plastique Ap

IV. 2. 3. 3. Classification des matériaux GTR 92(Norme NF – P 11 – 300)

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place.

Le GTR 92 (Guide de Terrassement Routiers) et la norme qui en découle NF – P 11 300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches sous forme d'infrastructures routières [8].

Dans cette caractéristique naturelle d'indice de plasticité qui nous permet de caractériser l'argilosité des sols sur trois seuils :

- 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux
- 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux

- 40 : limite entre sol argileux et très argileux

Normes à consulter selon les classifications des sols

NF P 11 – 300) : classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches sous forme d’infrastructures routiers.

NF P 94 – 052 : Détermination des limites d’Atterberg.

NF P 94 – 078 : Indice CBR immédiat, indice portance immédiat etc...

NF P 94 – 093 : Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié

Classement selon la nature			
Paramètre de nature Premier niveau de classement	classe	Paramètre de nature deuxième niveau de classement	Sous classe fonction de la nature
$D_{max} \leq 50\text{mm}$ Tamisât à 80 micros mètre > 35%	A Sols fins	$12 < IP \leq 25$	A2 Sable fins Argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes
		$25 < IP \leq 40$	A3 Argile et argile marneuse, limons très plastique

Tableau n° 9 : Classification selon les normes GTR des sols fins

Selon le tableau de synthèse des résultats de la limite d'Atterberg sur les quatre PK, on doit classer notre terre en deux paramètres de nature à partir de l'indice de plasticité :

- Sur le PK 1+050; 20+675 et 54+153 on a un indice de plasticité (IP) compris entre **12 et 25**, donc on a une sous classe fonction de la nature **A2** (Sables fins Argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes).

❖ *Classification des sols*

L'identification ou la classification des sols peut être faite en réalisant seulement qu'un essai laboratoire : la granulométrie ou la limite d'Atterberg (à l'aide du diagramme de plasticité). Mais pour un meilleur résultat d'identification, on devrait prendre en compte tous les paramètres issus de tous les essais du laboratoire.

En regroupant donc ces résultats, on peut identifier ou classer la nature des sols avec plus de certitude.

Il faut, tout d'abord, savoir que si plus de 50% des éléments ont des diamètres supérieurs à 0,008 mm, le sol est déjà classifié comme étant un sol grenu. Les résultats de la granulométrie nous indiquent un fort pourcentage d'éléments inférieur à 0,08mm, et ce qui nous amène à dire qu'on est généralement en présence des sols fins.

IV. 2. 4. Essai de compactage PROCTOR

L'essai Proctor modifié est réalisé par opération de compactage dans un moule métallique normalisé à l'aide d'une dame modifiée avec un certain nombre de coups bien définis pour déterminer la densité optimale en faisant varier la teneur en eau de compactage selon la norme NF P 94-093 octobre 2014. la courbe nous permet d'avoir la **teneur en eau optimale** (W_{opt}) et la **densité maximale** (γ_{dmax}). Dans ce cas on détermine d'abord les paramètres suivants :

Avec :

$$\gamma_d = \frac{\text{Poids du matériau humide}}{\text{Volume du moule}} \times 10 \text{ KN/m}^3 \longrightarrow \text{poids volumique humide}$$

$$\gamma_s = \frac{100 \times \gamma_d}{100 + W\%} \longrightarrow \text{poids volumique sec}$$

PROCTOR				
Mesure N°	1	2	3	4
Echant (Avant Etuvage)	4155	4305	4411	4468
Echant (Après Etuvage)	3677	3757	3763	3748
Poids Echant. Sec	3751	3757	3763	3748
Poids d'eau	478	548	648	720
Teneur en eau W% après compactage	12,74	14,59	17,22	19,21
Moule N°	1	1	1	1
Echantillon + Moule	8292	8442	8553	8522
Masse Moule	4137	4137	4137	4137
Masse Echantillon	4155	4305	4416	4385
h	11,784	11,772	11,756	11,702
Volume (cm³)	2138,32	2136,14	2133,24	2123,4
γ_h	1,94	2,01	2,07	2,06
γ_d	1,723	1,758	1,769	1,73
γ_d	1,72	1,76	1,77	1,73
Teneur en eau W%	12,74	14,59	17,22	19,21
γ_d max	1,765979839			
W% optimal	17,22030295			

Tableau n° 10: pour le calcul du Proctor modifié

Les deux (02) dernières valeurs correspondent à la teneur en eau optimale et à la densité sèche optimale. Elles sont déduites de la courbe sur la figure suivante, dont l'abscisse représente la teneur en eau et l'ordonnée la densité sèche.

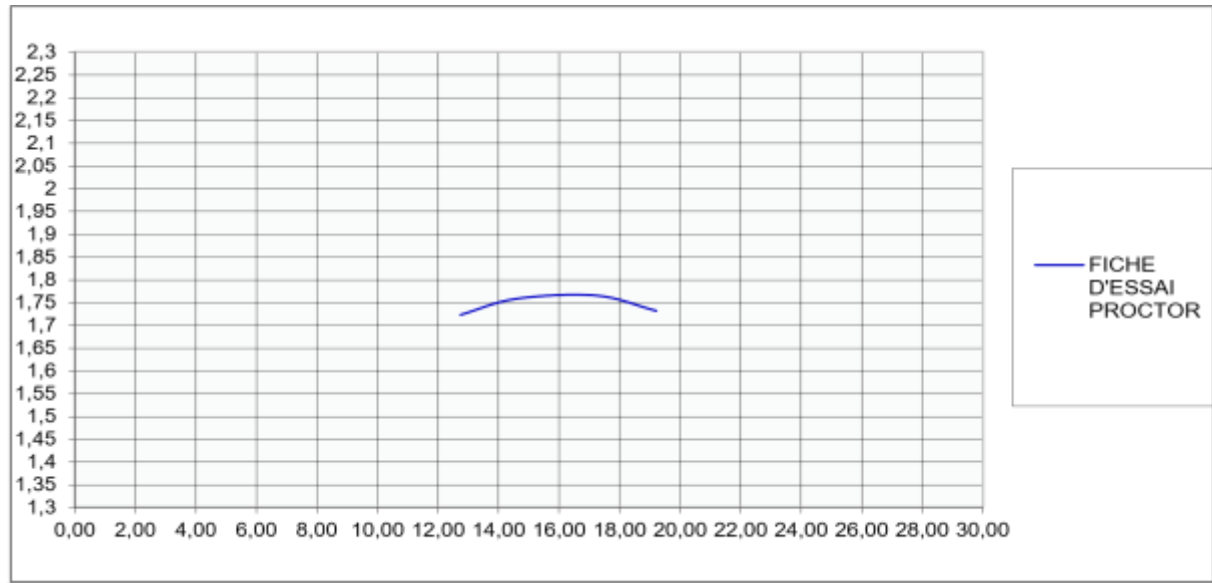


Figure 18 : Résultat de la courbe Proctor modifié

Voilà les résultats de l'essai Proctor Modifié. Cette courbe est obtenue à partir des quatre valeurs présentés dans les moules numérotés de 1 à 4.

PK		1+050	20+675	32+850	54+153
PROCTOR Modifié	γ_{dmax} (KN/m ³)	1,72	1,76	1,77	1,73
	ω_{opt} (%)	12,74	14,59	17,22	19,21

Tableau 11 : résultat Proctor

Pour l'énergie de compactage s'exprime (en KNm/m³) :

$$E = \frac{N.H.m.g}{V}$$

N : nombre total de coups ;

H : hauteur de chute de la dame ;

m : masse de la dame ;

g : accélération de la pesanteur ;

V : volume du matériau compacté dans le moule (Densité humide).

N = 25

H = 457mm

m = 4530g

g = 10N/kg

V = 2136 cm³

$$E = 242299.85 \text{ KNm/m}^3$$

Ces résultats correspondent à l'essai de compactage du gros volume, c'est-à-dire, du sol se trouvant à la surface où sera appliqué le procédé de compactage.

IV. 2 .5. Essai de Portance CBR

L'essai CBR consiste à déterminer la portance d'un sol compacté à des énergies relatives à l'essai PROCTOR selon la norme NF P 94 - 078 Mai 1997.

Le résultat de l'essai est présenté dans le tableau suivant :

PK			1+050	20+675	32+850	54+153
CBR AVANT IMMERSION	Wmoulage		13,6	13,4	29,8	16,9
	IC (%)	25 c	95	95	95	95
CBR AVEC IMMERSION	ICBR	25 c	26	18	13	36
	W f %	25 c	17,6	16,2	31,9	17,9
	Gft %	25 c	0,16	0,12	1,32	0,04
CBR		4 j	26	18	13	36

Tableau n°12: Résultats de l'indice portance CBR sur les quatre PK

Avec :

$$IC \% = \frac{\text{Poids volumique sec}}{\gamma_{dmax} \text{ (KN/m}^3\text{)}}$$

Pour **Indice portance CBR (I.CBR) d'immersion**, on le calcul en deux catégories selon l'enfoncement de l'anneau et selon la norme NF P 94 – 078 Mai 1997 :

$$\text{À } 2.5\text{mm} \frac{F(2.5)}{13,35} \times 100$$

$$\text{À } 5\text{mm} \frac{F(5)}{19,93} \times 100$$

F (2.5) = effort de pénétration à 2.5mm d'enfoncement (en KN)

F(5) = effort de pénétration à 5mm d'enfoncement (en KN).

13,35 KN et 19,93 KN sont respectivement les forces provoquant l'enfoncement du piston.

Dans ce cas on prend le résultat de l. CBR qui est la plus grande valeur de l'un de ceux équations. Voilà les résultats obtenu :

CBR	25 c	26	18	13	36
-----	------	----	----	----	----

Portance	CBR	Caractéristiques
0	<3	Sols peu déformables : incompatibles et non circulables ; Sols fins argileux saturés et à faible densité sèche en place.
1	3 à 6	Sols déformables : Classe A, B, ou C à teneur en eau élevée, réglage difficile (matelassage). Sensible à l'eau d'où la distinction entre 1 et 2.
2	6 à 10	
3	10 à 20	Sols peu déformables : sols fins ou grenus à fortes proportions de fines (A, B ou C) de teneur en eau moyenne ou faible.
4	>20	Sols très peu déformables : insensibles à l'eau (classe D surtout)

Tableau n° 13 : classer la portance du sol selon la méthode LCPC

On a un CBR qui est > 20, donc on a une portance **P = 4 sols très peu déformables**

IV. 3. DISCUSSIONS DE RESULTATS et INTERPRETATIONS

En regroupant tous les résultats des différents essais et sondages, on a pu aboutir à ces tableaux récapitulatifs ci-après.

Les paramètres qui ont des valeurs très voisines ont été représentés comme étant une seule classe. Les valeurs présentées sont donc des moyennes calculées :

SONDAGE SPECIFIQUE			1	2	3	4
PK			1+050	20+675	32+850	54+153
Nature apparente des sols			Argile Limoneuse grisâtre + grains	Sable Limoneux Blanchâtre	Argile limoneuse grisâtre + grains	Argile limoneuse grise + grains
Teneur en eau			4,4	4,8	12,6	6
IDENTIFICATION	Granulo--Sedimento %d passant à	Ømax mm	50	5	31,5	40
		2mm	42	98	52	34
		0,40mm	37	65	46	29
		80µ	34	30	43	24
	L.Atterberg	Wl (%)	46	39	46	38
		Wp (%)	26	24	24	24
		Ip %	20	15	22	14
	teneur en M.O(%)		1,8	0,7	2,3	2,2
CLASSIFICATIO N	HRB		A2-7	A2-6	A7-6	A2-6
	LPC		GA	SA	GA	GA
	GTR		B6	B6	A2	B6
PROCTOR Modifié	γ _d max (KN/m³)		1,72	1,76	1,77	1,73
	ω _{opt} (%)		12,74	14,59	17,22	19,21
ΔW= W-Wopt			7,8	8,5	12,3	9
CBR SANS IMMERSION	Wmoulage		13,6	13,4	29,8	16,9
	IC (%)	25 c	95	95	95	95
CBR AVEC IMMERSION	ICBR	25 c	26	18	13	36
	W f %	25 c	17,6	16,2	31,9	17,9
	Gft %	25 c	0,16	0,12	1,32	0,04
CBR		4 j	26	18	13	36

Tableau n° 14:récapitulation des résultats

- Dans notre cas sur l'essai de la limite d'Atterberg on a comme résultats d'IP et d'Ic qui nous permet de classer selon la nature du sol et selon leur état hydrique.
- Comme notre paramètre de nature Ip est compris entre $12 < I_p < 25$, donc notre sol sur le classement de nature et de sous classe **A2** composé du sable fin argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes.
- L'essai CBR a une importance de **P = 4** sols très peu déformables (insensibles à l'eau)

Classification des sols fins

 Classe **A**

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A	VBS ≤ 2,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	A ₁ Limon très plastique, limon, silt argileux, silt fin, argiles, marnes peu plastiques...	IP ⁽¹⁾ ≤ 3 ou W _L ≥ 1,25 W _{OPH}	A ₁ th
				3 < IP ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 ≤ W _L < 1,25 W _{OPH}	A ₁ h
				8 < IP ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 0,9 W _{OPH} ≤ W _L < 1,1 W _{OPH}	A ₁ m
				0,7 W _{OPH} ≤ W _L < 0,9 W _{OPH}	A ₁ s
				W _L < 0,7 W _{OPH}	A ₁ ts
				IP ⁽¹⁾ ≤ 2 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,9 ou W _L ≥ 1,3 W _{OPH}	A ₂ th
		12 < I _p ≤ 25 ⁽¹⁾ ou 2,5 < VBS ≤ 6	A ₂ Silt fin argileux, limon, argiles et marnes peu plastiques arènes...	2 < IP ⁽¹⁾ ≤ 5 ou 0,9 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1,05 ou 1,1 W _{OPH} ≤ W _L < 1,3 W _{OPH}	A ₂ h
				5 < IP ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,05 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPH} ≤ W _L < 1,1 W _{OPH}	A ₂ m
				1,2 < I _c ≤ 1,4 ou 0,7 W _{OPH} ≤ W _L < 0,9 W _{OPH}	A ₂ s
				I _c > 1,3 ou W _L < 0,7 W _{OPH}	A ₂ ts
25 < I _p ≤ 40 ⁽¹⁾ ou 6 < VBS ≤ 8	A ₃ Argiles et argiles marneuses, limon très plastique...	IP ⁽¹⁾ ≤ 1 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,8 ou W _L ≥ 1,4 W _{OPH}	A ₃ th		
		1 < IP ⁽¹⁾ ≤ 3 ou 0,8 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1 ou 1,2 W _{OPH} ≤ W _L < 1,4 W _{OPH}	A ₃ h		
		3 < IP ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 1 < I _c ≤ 1,15 ou 0,9 W _{OPH} ≤ W _L < 1,2 W _{OPH}	A ₃ m		
		1,15 < I _c ≤ 1,3 ou 0,7 W _{OPH} ≤ W _L < 0,9 W _{OPH}	A ₃ s		
I _p > 40 ⁽¹⁾ ou VBS > 8	A ₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	I _c > 1,3 ou W _L < 0,7 W _{OPH}	A ₃ ts		
		Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	A ₄ th		
			A ₄ h		
			A ₄ m		
			A ₄ s		

Tableau n° 15:CLASSIFICATION DES SOLS FINS

-Comme notre paramètre d'état I_c est strictement supérieur à 1,3 ($I_c > 1,3$) donc notre sol est sous classe fonction de l'état A2 très sec(ts). Suivant le tableau ci-dessus de la classification des sols fins.

Selon les résultats obtenus, on peut déduire que notre sol à un degré peu plastique, une forte résistance du sol à l'état sec (1 à 2 bar) et peu déformable pour une simple pression.

Donc d'après la Norme N FP 11 300, avec **l'état hydrique très élevé ne permettant plus la réutilisation du sol dans des conditions technico-économiques.**

IV. 4. SUGGESTIONS et RECOMMANDATIONS D'EXECUTION

1. Terrassement

Le terrassement concernera essentiellement à un léger nivellement de la plateforme actuelle. On veillera à procéder lors du nivellement à ce que les travaux s'effectuent lors d'une condition météorologique favorable (période non pluvieuse prolongée) afin de se prémunir contre toute diminution de la qualité de portance de la plateforme : inhibition des terrains de la plateforme, ruissellement, remaniement, détérioration par la circulation des engins de chantier...

Ainsi en phase chantier, en cas de fortes pluies, toutes les mesures conservatoires seront impérativement mises en œuvre afin de préserver la qualité de la plateforme [5].

2. Remblai technique

Le sol support du remblai technique sera débarrassé de toute poche ou niveau de sols mous et/ou organiques ou de déchets de toute origine [8]. Ils seront purgés, évacués et seront substitués par la mise en place de matériaux correctement et suffisamment compactés. Le remblai technique sera réalisé en matériaux de type GNT 0/63 insensibles à l'eau. La plateforme sera compactée suivant les paramètres de compactage suivants :

❖ Essai Proctor modifié:

Teneur en eau : 2,2%
Energie de compactage : = 2,4 kJ/dm³
Poids volumique : 17,22

NB : Réseaux et canalisations

Il sera judicieux de porter une attention particulière à la conception des réseaux enterrés. Ces deniers pourront par exemple constituer des systèmes emboîtés et/ou articulés afin de remédier à l'action de tout tassement.

On prévoira l'exécution d'un drainage périphérique pour l'évacuation des eaux pluviales hors de la plateforme.

On se rapprochera des organismes officiels compétents et habiles afin de connaître le niveau des plus hautes eaux atteint par la nappe dans le secteur du projet ainsi que les mesures de protection mentionnées ou imposées.

CONCLUSION

L'objectif initial de notre étude a été d'effectuer une étude géotechnique d'un site se trouvant à Sisaony dans la commune de Soavina, afin de réhabiliter la route. Et de fournir les paramètres nécessaires liés à la réparation.

On a utilisé les méthodes des essais d'indentification du sol et la tarière permet de fournir les échantillons de sol pour les études en laboratoire qui nous ont donné un sable fin argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes. Sur ce, on a pu conclure d'après les normes qu'on a un sol très sec qui n'autorise plus la réutilisation du sol dans des conditions technico-économiques normales.

Les résultats des investigations ont pu aboutir à un profil du sous-sol avec des paramètres nécessaires pour la construction. On a constaté 4 types de formations depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur de plus d'une douzaine de mètres: la première formation est constituée de remblai de limon, allant jusqu'à 2m de profondeur. Puis une couche d'argile et de limon très humide et plastique, de résistance très médiocre couvrant une épaisseur d'environ 3m. La troisième formation a une épaisseur de 3m avec une résistance moyenne, et de faible qualité de portance ; elle est constituée généralement d'argile peu plastique. La dernière formation, par contre a une grande résistance dynamique et de grande capacité portante. Elle est formée par la décomposition partielle de granite et de granite peu altéré mais très compact ; seulement elle est localisée à partir de plus de 8m de profondeur. Les résultats du laboratoire ont pu confirmer la vraie nature de chaque formation et de fournir les paramètres de compactage du remblai.

Compte tenu du contexte géotechnique et hydrologique du site objet de l'étude, on s'orientera de préférence vers une solution de fondation profonde de type pieux forés ou autre méthode adaptée aux contraintes du projet et à celle liée à la géotechnique et à l'hydrogéotechnique. De ce fait, compte tenu du contexte géotechnique de la plate-forme de l'étude, on s'orientera de préférence vers une solution de déblai et remblai des matériaux sélectionnés. Notre modeste expérience nous a permis de découvrir un appareillage aussi efficace pour connaître la cohésion du terrain d'une chaussée et sa classification. Dans le cas du sol de différentes couches, cet essai nous permet de classer la nature du sol et son état hydrique.

Pour un projet : une route nécessite une couche de sol d'ancrage de très grande résistance et de portance. Ce qui revient à chercher la formation de roche saine (granit sain), et qu'on ne peut trouver avec notre méthode. La méthode géophysique par sismique réfraction serait une meilleure méthode d'investigation pour plus d'information.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR, octobre 1999, norme française NF P 94 – 093, Reconnaissance des sols et essais de détermination des références de compactage d'un matériau, Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié, page 18.
- [2].Cours de Sondage et Forage, cours mécanique des sols (fichier PDF), MSTGG2, Faculté des Sciences Université d'Antananarivo.
- [3]. AFNOR1999 & Norme Européenne NF EN ISO 14688-1. *Sols : reconnaissance et essais géotechniques* (réf : NF P ...)
- [4] AFNOR, mai 1997, norme française NF P94-078, Reconnaissance des sols et essais de détermination d'Indice CBR après immersion, d'Indice CBR immédiat et Indice portance immédiat, page 12
- [5]. C.Plumelle, CNAM-Géotechnique B1/B6 -2004-2005,
- [6]. J.M. TCHOUANI NANA avril1999 & M.CALLAUD décembre 2004. *Cours de mécanique des sols – Tome1*. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement ; 137 pages.
- [7]. C.Paillier, 2006. *Travaux pratique géotechnique* : IUT St Pierre-Département Génie Civil ; 12Pages
- [8] **GTR** 1992(Guide de Terrassement Routiers) Norme française NF – P 11 300, Classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routiers,

WEBOGRAPIES

[http://www.lb.refer.org/kourdey/reconnaissance du sol.htm](http://www.lb.refer.org/kourdey/reconnaissance%20du%20sol.htm), *chapitre I-U2*

[http://www.leaders.net/essai pressiométrique.pdf](http://www.leaders.net/essai%20pressiom%C3%A9trique.pdf)

[http://www.leaders.net/essai pénétrométrique.pdf](http://www.leaders.net/essai%20p%C3%A9n%C3%A9trom%C3%A9trique.pdf)

<http://legeotechnicien.blogspot.com/2010/08/moyens-dinvestigation-in-situ-2.html>

http://www.memoireonline.com/08/09/2582/m_Recherche-de-correlations-entreessais-au-pressiometre-et-au-penetromeg.html

<http://www.solem.ch/Tunnel/didacticiel/reconnaissances/reconnaissances/essaisInSituCptEtAutres.htm>

http://www.mssmat.ecp.fr/sols/enseignements/tp_gc/enonce/Essai%20Pressiometrique

<http://geomecasol.free.fr>

<http://www.cfms-sols.org>

TABLE DES MATIERES

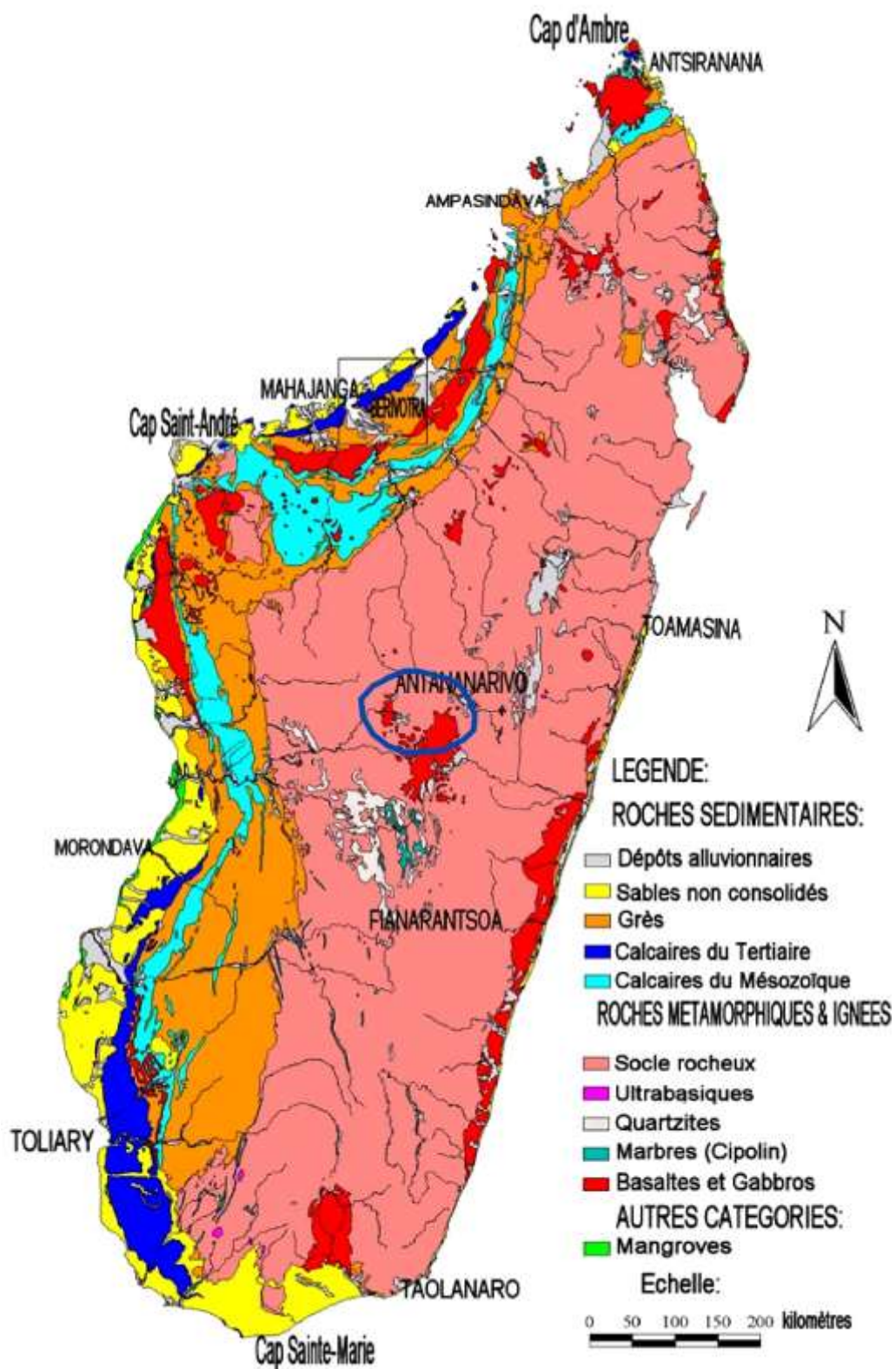
REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE	ii
NOMENCLATURE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	1
APERCU GENERAL.....	1
DU PROJET	1
CHAPITRE I APERCU GENERAL DU PROJET	
I. 1. CONTEXTE GENERAL	3
I. 2. Description sommaire du projet.....	3
I.3. Situation géographique.....	4
I. 4. Topographie du site	6
I. 5. Contexte géologique	6
<i>Socle cristallophyllien</i>	6
<i>Plaine alluviale</i>	7
<i>Bas-fonds</i>	8
I. 6. Missions de l'étude géotechnique	9
I. 6 .1. Reconnaissance des sols.....	10
I. 6. 2. Conception de la plate-forme support de chaussée (PFSC)	10
I. 6. 3. Conception du corps de chaussée	11
I. 6. 4. Le classement géotechnique des sols naturels.....	11
I. 7. Caractéristique des travaux de reconnaissance du sol	12
I. 7. 1. Paramètres caractérisant la nature des sols :	13
II. 3. 2. Paramètres caractérisant le comportement des sols naturel	13
CHAPITRE II : ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE	
CHAPITRE II : ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE.....	14
II. 1. Objectifs de la reconnaissance.....	14
II. 2. Organisation de la reconnaissance.....	14
II. 2. 1. Profondeur de reconnaissance :	14
II. 2. 2. Mode de reconnaissance :	14
II. 2. 3. Choix d'un tracé routier :.....	15
II. 3. Investigations préliminaires	16

II. 3. 1. Sondages à la tarière	16
a. Objectifs des sondages	16
b. Principe de fonctionnement	16
c. Mode opératoire	18
CHAPITRE III : ESSAIS EN LABORATOIRE	
CHAPITRE III : ESSAIS EN LABORATOIRE	20
III. 1. PREPARATION D'ECHANTILLONNAGE :	20
III. 2. ESSAI D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DU SOL	21
III. 2. 1. Teneur en eau NF P94-050:.....	21
a-Définition.....	21
b- Principe:.....	21
c- Appareillage :.....	21
d-Conduite de l'essai :	22
Pour déterminer la teneur en eau d'un matériau, les étapes utilisées sont:.....	22
✓ Prélever un échantillon.	22
✓ Peser la boîte pétrie (p1).	22
✓ Prélever un échantillon.	22
✓ Placer l'échantillon sur la boîte de pétri.	22
✓ Peser l'échantillon avec la boîte de pétri (p2).	22
✓ Mettre à l'étuve à 60°C c à 105°C jusqu' à dessiccation et poids stable (environ 24 h).	22
✓ Peser l'échantillon sec avec la boîte de pétri après la sortie de l'étuve (p3)	22
III. 2. 2. Granulométrie par tamisage.....	22
a- Définition:.....	22
III. 2. 2. 1. Granulométrie.....	23
a-Principe et appareillage	23
b. Mode opératoire	24
❖ <i>Trempage et lavage de l'échantillon</i>	24
❖ <i>Séchage</i>	24
III. 2. 3. Essai d'Atterberg NF P 94-051	26
a-définition	26
b-Principe:.....	27
c-Appareillage :.....	27
d.Mode opératoire et exemple de résultat:	27
III.2.4. ESSAI DE COMPACTAGE : « PROCTOR MODIFIE » _ NFP 94-093.....	30
a-Définition	30
b-But et principe de l'essai PROCTOR.....	30

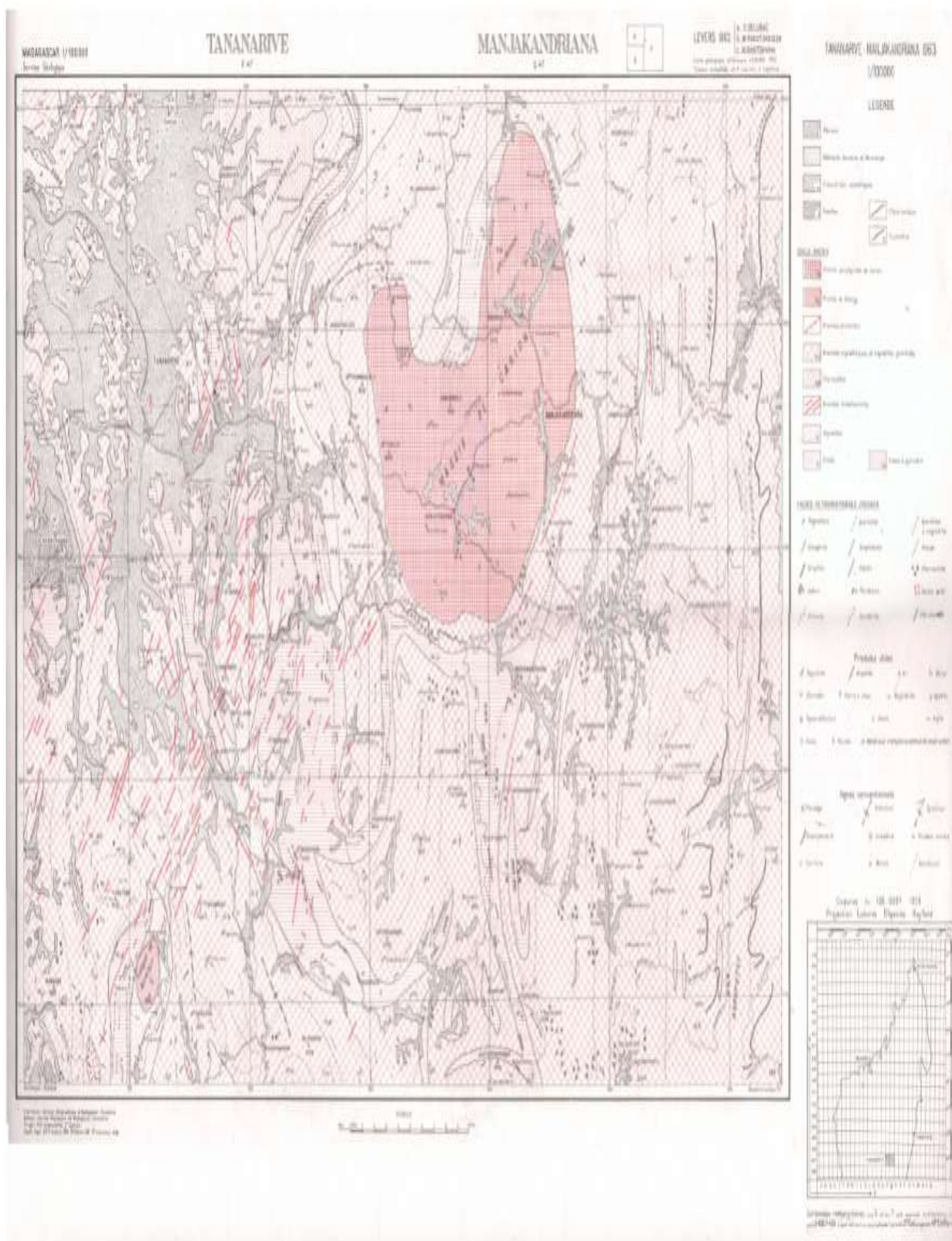
<i>c. Matériels utilisés</i>	31
<i>d.Préparation de l'échantillon</i>	31
<i>e.Mode opératoire</i>	32
III.2.5. ESSAI DE PORTANCE : « CBR, Le California Bearing Ratio »	33
a) But et Principe de l'essai	34
b) Matériels utilisés	34
c) Prise d'échantillon	34
d) Mode opératoire	35
e) Expression du résultat	35
CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	36
.....	Erreur ! Signet non défini.
IV. 1. Sondage à la tarière	37
IV. 2. RESULTATS DU LABORATOIRE	38
IV. 2. 1. Résultats de l'essai teneur en eau naturelle W%:	38
❖ RESULTATS	39
IV.2.2.Granulométrie et Poids spécifique (ρ_s)	40
IV. 2. 3. Les résultats de l'essai des limites d'Atterberg	41
IV. 2. 3. 1. Limite de liquidité	41
IV. 2. 3. 3. Classification des matériaux GTR 92(Norme NF – P 11 – 300)	44
IV. 2. 4. Essai de compactage PROCTOR	46
IV. 2 .5. Essai de Portance CBR	49
IV. 3. DISCUSSIONS DE RESULTATS et INTERPRETATIONS	51
IV. 4. SUGGESTIONS et RECOMMANDATIONS D'EXECUTION	54
1. Terrassement	54
2. Remblai technique	54
CONCLUSION	55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	I
WEBOGRAPHIES	II
TABLE DES MATIERES	III
ANNEXE	VI

ANNEXE

ANNEXE1 CARTE GEOLOGIQUE DE MADAGASCAR



ANNEXE 2 CARTE GEOLOGIQUE



ANNEXE 3 CLASSIFICATION DES SOLS FINS

Tableau 1 - *Classification des sols fins*

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A	VBS ≤ 2,5 (*) ou Ip ≤ 12	A1 Limon peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IP1 (*) ≤ 3 ou Wn ≥ 1,25 WOPN	A1 th	
				3 < IP1 (*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ Wn < 1,25 WOPN	A1 h	
				8 < IP1 ≤ 25 ou 0,9 WOPN ≤ Wn < 1,1 WOPN	A1 m	
				0,7 WOPN ≤ Wn < 0,9 WOPN	A1 s	
				Wn < 0,7 WOPN	A1 ts	
		12 < Ip ≤ 25 (*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IP1 (*) ≤ 2 ou Ic (*) ≤ 0,9 ou Wn ≥ 1,3 WOPN	A2 th	
				2 < IP1 (*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ Ic (*) < 1,05 ou 1,1 WOPN ≤ Wn < 1,3 WOPN	A2 h	
				5 < IP1 ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 WOPN ≤ Wn < 1,1 WOPN	A2 m	
				1,2 < Ic ≤ 1,4 ou 0,7 WOPN ≤ Wn < 0,9 WOPN	A2 s	
				Ic > 1,3 ou Wn < 0,7 WOPN	A2 ts	
		25 < Ip ≤ 40 (*) ou 6 < VBS ≤ 8	A3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IP1 (*) ≤ 1 ou Ic (*) ≤ 0,8 ou Wn ≥ 1,4 WOPN	A3 th	
				1 < IP1 (*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ Ic (*) < 1 ou 1,2 WOPN ≤ Wn < 1,4 WOPN	A3 h	
				3 < IP1 ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou 0,9 WOPN ≤ Wn < 1,2 WOPN	A3 m	
				1,15 < Ic ≤ 1,3 ou 0,7 WOPN ≤ Wn < 0,9 WOPN	A3 s	
				Ic > 1,3 ou Wn < 0,7 WOPN	A3 ts	
		Ip > 40 (*) ou VBS > 8	A4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		

ANNEXE 4 CLASSIFICATION DES SOLS OU GRAVELEUX, avec FINES

(*) Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**Tableau 2 - *Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines*

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS				CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B ₁ Sables siliceux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B ₂ Sables argileux (peu argileux)...	IP _I (*) ≤ 4 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
				4 < IP _I (*) ≤ 8 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}		FS > 60	B ₂₁ h
				0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
				0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₂ s	FS > 60	B ₂₁ s
				w _n < 0,5 w _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts
						FS > 60	B ₂₂ ts
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B ₃ Graves siliceuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁
						LA > 45 et MDI ≤ 45	B ₃₂

(*) Paramètres dont le choix est à privilégier

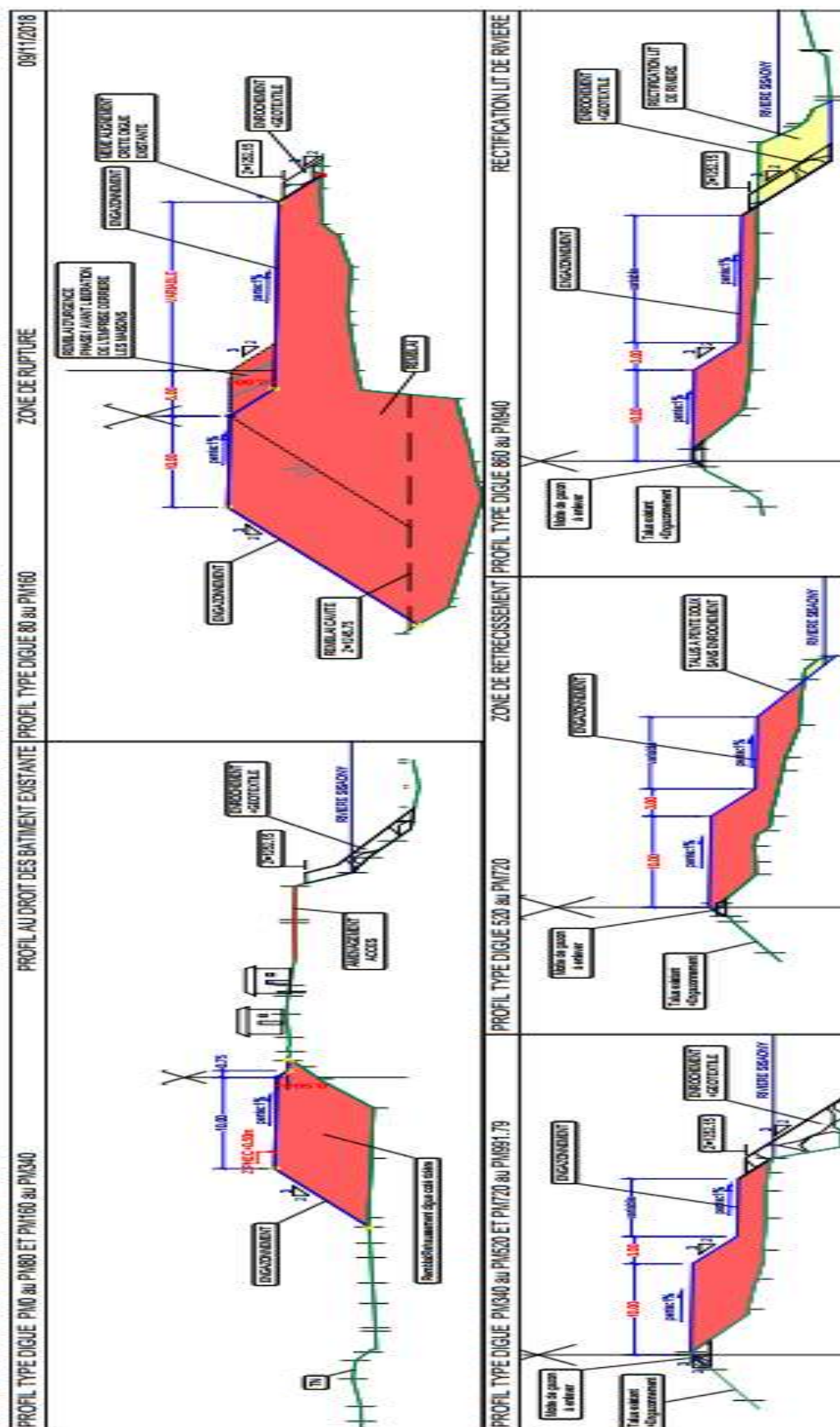
ANNEXE 5 CLASSIFICATION DES SOLS COMPORTANT DES FINES ET DES GROS ELEMENTS

Tableau 3 - *Classification des sols comportant des fines et des gros éléments*

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	
Dmax > 50 mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₁ A _i Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...	Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B * 1 ^{er} exemple : un sol désigné C ₁ A ₂ h est un sol qui est : o soit entièrement roulé, o soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A ₂ avec un état hydrique h. * 2 ^{ème} exemple : un sol désigné C ₁ B ₄₂ m est un sol qui est : o entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B ₄₂ se trouvant dans un état hydrique m. Les différents sous-classes composant la classe C sont :
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C ₁ B _i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...	
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C ₂ A _i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex....	
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C ₂ B _i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex....	

C ₁ A ₁	C ₁ A ₃	C ₂ A ₁	C ₂ A ₃	Etat th, h, m, s ou ts
C ₁ A ₂	C ₁ A ₄	C ₂ A ₂	C ₂ A ₄	
C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₃₁	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₃₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique
C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₃₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₃₂	
C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₅₁	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₅₁	Etat th, h, m, s ou ts
C ₁ B ₂₂	C ₁ B ₅₂	C ₂ B ₂₂	C ₂ B ₅₂	
C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₆	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₆	
C ₁ B ₄₂		C ₂ B ₄₂		

ANNEXE 6 PROFIL A DROIT TYPE DIGUE



1/3000



« ESSAI LABORATOIRE DES SOLS DESTINES A LA
REHABILITATION ROUTIERE DE LA COMMUNE DE
SOAVINA »



Résumé

L'étude est axée sur l'établissement d'une procédure de classification du sol d'une plate-forme constituant la piste Sisaony/Soavina en cours de réhabilitation. Des essais laboratoires portant sur « Limite d'atterberg, Proctor modifié, CBR ». Ont été réalisés en suivant la norme AFNOR pour connaître les caractéristiques mécaniques du sol.

L'objectif est de définir les spécificités et les contraintes géotechniques du site de réhabilitation vis-à-vis de sol disponible à la mise en place de la plateforme, de fournir les informations nécessaires permettant le dimensionnement de la fondation et de donner les suggestions et les recommandations à l'exécution des travaux.

L'échantillonnage a été réalisé avec tarière à main. Le sol récolté a fait l'objet d'identification et de classification permettant de définir son utilité ultérieure sur la zone de projet et sur les couches la piste.

Mots clés : plate-forme, réhabilitation, atterberg, Proctor modifié, contraintes, fondation, tarière, couche.

Abstract

Our study consists in establishment of soil process for the rehabilitation of Sisaony / Soavina road platform. It is based on the laboratory tests like "Atterberg limit, modified Proctor, CBR", which follows the AFNOR norm for the soil mechanical parameter.

The study has à target to define specificities and geotechnical strains of soil on study area in considering the mechanical state filling soil, to provide more information's on foundation processing, to define the nature of soil and treatment need on foundation building and to give suggestions and recommendations.

The sampling was done with auger. The collected soil was identified and classified for in order to define theirs uses on project area and also on the specified layer belong to the road.

Key words: platform, rehabilitation, atterberg, modified proctor, stresses, foundation, auger, layer

Encadreur professionnel : Dr RAKOTO Heritiana

Auteur : NADHOIM Ibrahima

Téléphone : 0344662435

E-mail : cnadhoim@gmail.com