UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTES DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Mémoire pour l'obtention du
Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.)
en Sciences de la Terre et de l'Evolution
Option GEOTECHNIQUE

Recherche de matériau et choix des moyens de mise en œuvre pour la résolution des problèmes géotechniques de la RN 44, pk 74+500 au pk 88+000, dans la plaine de Mangoro-Ankay, Centre de Madagascar

par

ANDRIAMAMONJISOA Solofo Nirina

Année 2012

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTES DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Mémoire pour l'obtention du
Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)
en Sciences de la Terre et de l'Evolution
Option GEOTECHNIQUE

Recherche de matériau et choix des moyens de mise en œuvre pour la résolution des problèmes géotechniques de la RN 44, pk 74+500 au pk 88+000, dans la plaine de Mangoro-Ankay, Centre de Madagascar

par

ANDRIAMAMONJISOA Solofo Nirina

Soutenu publiquement le 24 Mai 2012

Membres de jury

Président :	RALISON André Bruno, Maître de conférences
Rapporteurs :	RAMASIARINORO Voahanginirina Jeanine, Maître de conférences
	ANDRIANAIVO Lala, Professeur
Examinateur :	RANDRIANJA Roger, Professeur titulaire

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS i

LISTE DES FIGURES iii

LISTE DES TABLEAUX iv

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ANNOTATIONS v

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : ETUDES PRELIMINAIRES DU PROJET DE REHABILITATION 3

I.1. CONTEXTE ADMINISTRATIF ET GEOGRAPHIQUE 3

I.1.1. Situation administrative de la zone d'étude 3

I.1.2. Situation Géographique 5

I.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE 8

I.3. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE 11

I.3.1. Erosion 13

I.3.2. Ensablement 13

I. 3.3. Formation des lavakas 13

I.4. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE 15

I.5. CONTEXTE PEDOLOGIQUE 17

I.6. CONTEXTE ECONOMIQUE 19

I.7. CONCLUSION PARTIELLE 20

I.8. SITUATION TECHNIQUE DE LA ROUTE 20

I.9. ECHANTILLONNAGE 22

I. 9.1. Matériaux meubles 22

I. 9.2. Matériaux rocheux 22

I.10. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 24

CHAPITRE II : ETUDES GEOTECHNIQUES 25

II.1. LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT 25

II.1.1. Etude du risque de tassement du remblai 25
II.1.2. Matériau pour couche de remblai 27
II.2. ETUDE SUR LA CHAUSSEE 27
II.2.1. Choix du type de chaussée 27
II.2.2. Les matériaux pour couche de la chaussée 28
II.2.3. Caractéristiques et fonctions de chaque couche 30
II.3. ETUDE DES MATERIAUX POUR LA REALISATION DES TRAVAUX 35
II.3.1. Les matériaux meubles 35
II.3.2. Les matériaux rocheux 53
II.4. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 61
CHAPITRE III : PROPOSITION DE SOLUTIONS DURABLES 62
III. 1. MESURE A PRENDRE FACE AUX PROBLEMES IMPOSES PAR LES SITUATIONS IN-SITU 62
III.1.1. Sur l'environnement de la route 62
III.1.2. Sur la route 63
III.2. CONTRIBUTION DE LA GEOTECHNIQUE 64
III.2.1. Remblayage 64
III.2.2. Ouvrage de décharge et de franchissement 64
III.3. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 83
CONCLUSION GENERALE 84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 87
ANNEXES
Annexe 1 : Classification des sols H.R.B.
Annexe 2 : Classification des sols L.P.C.
Annexe 3 : Classification des sols G.T.R.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la santé, de m'avoir dirigé et illuminé pendant la réalisation de ce travail.

Sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire :

- Monsieur ANDRIANANTENAINA Bruno Jacques, Doyen de la Faculté des Sciences, Maître de conférences, pour son approbation quant à la soutenance de ce mémoire ;
- Monsieur RALISON André Bruno, Chef de Département des Sciences de la Terre, Maître de conférences, pour son autorisation et l'immense honneur qu'il nous a fait de bien vouloir présider la soutenance ;
- Madame Voahanginirina Jeanine RAMASIARINORO, Maître de conférences au sein du Département des Sciences de la Terre, Responsable de l'option Géotechnique, Directeur de ce mémoire, pour avoir déployé ses efforts quant à la réalisation du présent mémoire grâce à son précieux encadrement ;
- Monsieur ANDRIANAIVO Lala, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour ses appuis techniques, Co-directeur de mémoire, conseils divers et encouragement ;
- Monsieur RANDRIANJA Roger, Professeur titulaire à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, membre de la commission d'évaluation du mémoire et de nous faire l'honneur de sa présence parmi les membres du jury ;
- les Responsables de la MTPM ;
    - Monsieur le Directeur Général des Travaux Publics, RAFANOMEZANA Dominique, pour ses appuis;
    - Madame le Chef du Projet RN 44 Lot 1, RAZAFIMBOLOLONA Ralinoro, pour ses précieuses collaborations tout en facilitant mes descentes sur le terrain à la RN 44.
- les Responsables de la LNTPB ;

- Monsieur le Directeur Général de la LNTPB, RANDRIANARISATA Louis de Gonzague, pour m'avoir autorisé à effectuer un stage au sein de son établissement ;
- Monsieur le chef du laboratoire Chantier LNTPB, RN 44 Lot 1, RAKOTOJAONA Julien, pour son aimable accueil et assistance technique durant mes séjours.

- tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre, ainsi que le Personnel Administratif et Technique ;
- mes parents, mes frères et ma famille pour leur soutien moral et encouragement dans l'accomplissement de ce mémoire.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation administrative de la zone d'étude 4
Figure 2: Carte d'occupation des sols de la Commune d'Andaingo 7
Figure 3: Carte géologique de la Commune d'Andaingo 10
Figure 4: Profil en 3D de la zone d'étude 12
Figure 5: Caractéristique morphologique de la région 14
Figure 6: Carte hydrographique de la Commune d'Andaingo 16
Figure 7: Carte pédologique de la zone d'étude 18
Figure 8: Carte d'échantillonnage 23
Figure 9: Coupe géotechnique du terrain dans la zone de terrassement 26
Figure 10: Les différentes couches de la chaussée (Chaussée souple) 28
Figure 11: Site d'extraction des blocs de roche après abattage à la dynamite à la Carrière de Marohady 29
Figure 12: Concassage des blocs de roche en GCNT de dimension déterminé 30
Figure 13: Courbe granulométrique des matériaux meubles (S_1 à S_7) 37
Figure 14: Courbe granulométrique des matériaux meubles (S_8 à S_{14}) 38
Figure 15: Courbe de référence pour l'analyse granulométrique 39
Figure 16: Les divers états d'un sol ; (a) : état liquide, (b) : état plastique, (c) : état solide 40
Figure 17: Abaque de plasticité de Casagrande 45
Figure 18: Type d'argile en fonction de l'indice de plasticité et de la limite de liquidité 46
Figure 19: Courbe granulométrique des mélanges 50
Figure 20: Courbe du mélange S_{14} et Sable blanc ICBR = f (%S_{14} + % Sable blanc) 52
Figure 21: Courbe granulométrique pour la couche de fondation 0/60 et son fuseau de référence 57
Figure 22: Courbe granulométrique pour la couche de base 0/40 et son fuseau de référence 58
Figure 23: Profil en travers type en traversée de village (Fossé rectangulaire) 65
Figure 24: Profil en travers type en rase campagne (Fossé triangulaire) 66
Figure 25: Compactage d'un sol pulvérulent et bien drainé (par une contrainte σ1- σ3) 70
Figure 26: Compactage d'un sol peu drainer (par une contrainte σ1- σ3) 71
Figure 27: Route bitumée et mise en service à l'entrée du village d'Andranomadio (pK 76+ 500) 83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Surface et taux de répartition des unités au sol dans la Commune rurale d'Andaingo 5
Tableau 2: Découpage en section homogène de la RN44 entre le pk 20 et le pk 133 21
Tableau 3: Caractéristique géotechnique du remblai 27
Tableau 4: Epaisseur des assises de la chaussée en fonction de la portance de la plate forme et de la classe de trafic 30
Tableau 5: Fuseau typique pour les graveleux latéritiques pour matériaux sélectionnés 32
Tableau 6: Spécification technique pour les graveleux latéritiques 33
Tableau 7: Caractéristiques des matériaux constitutifs de chaque couche de la chaussée. 34
Tableau 8: Pourcentage des grains en fonction de leur dimension 36
Tableau 9: Classification des sols en fonction de la granulométrie et des limites d'Atterberg (Classification HRB, LPC et GTR). 41
Tableau 10: Dénomination selon chaque classification (HRB, GTR, LPC et Casagrande) 43
Tableau 11: Tableau récapitulatif des résultats obtenus aux laboratoires 48
Tableau 12: Résultats des essais pour les 3 mélanges différents selon la proportion en S_{14} et en sable blanc 51
Tableau 13: Résultats obtenus lors des essais au laboratoire pour le mélange idéal 53
Tableau 14: Description pétrographique des échantillons rocheux 54
Tableau 15: Résultats des essais mécaniques et leur probable utilisation dans les travaux routiers. 55
Tableau 16: Résultats des essais de contrôle 60
Tableau 17: Valeurs de la compacité admissible pour chaque couche en fonction des matériaux qui la constituent. 72
Tableau 18: Résultats de la planche d'essais pour la couche de fondation en Matériaux sélectionnés 73
Tableau 19: Mesure de compacité sur la couche de fondation en matériaux meubles 74
Tableau 20: Résultat de la planche d'essai pour la couche de fondation en GCNT 0/60 76
Tableau 21: Mesure de compacité sur la couche de fondation en GCNT 0/60 77
Tableau 22: Résultat de la planche d'essai pour la couche de base en GCNT 0/40 79
Tableau 23: Mesure de compacité sur la couche de Base en GCNT 0/40 80
Tableau 24: Caractéristiques des matériaux de la couche de roulement 81

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ANNOTATIONS

A : axe

AL : Argile Limoneux

BCEOM : Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre Mer

CA : Coefficient d'Aplatissement

CBR: Californian Bearing Ratio

CEBTP : Centre Expérimental de Recherche et d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics

ES : Equivalent de Sable

ETP : Evapo – Transpiration Potentielle

$\gamma_{d\ max}$**:** Poids volumique sec maximum Proctor ;

γ_s **:** Poids spécifique

GESFORCOM : Gestion Forestière communale et communautaire

GCNT : Grave Concassé Non Traité

GTR : Guide de Terrassement Routier

HRB: Highway Research Board

IP: Indice de Plasticité

kN : KiloNewton

L A: Los Angeles

LNTPB : Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments

LPC : Laboratoires des Ponts et chaussées

LS : Limon sableux

LP : Limon Plastique

MDE : Micro DEval

MS : Matériaux sélectionnés

MTPM : Ministère des Travaux Publics et de la Météorologie

NF- P : Norme Française – Pages

OPM : Optimum Proctor Modifié

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer

P : Pneumatique

RN : Route Nationale

R : Roche

S : Sol

σ : Contrainte

SMATP : Société Malgache des Travaux Publics

T : Trafic

τ : Déformation

% F : Pourcentage de passant à 80µm

% G : Pourcentage de gonflement après 4 jours d'imbibition

u : Pression interstitielle

V : Vibrant

ω_L : Limite de liquidité

ω_{nat} : Teneur en Eau naturel

ω_{opt} : Teneur en eau optimum

INTRODUCTION GENERALE

Cette étude rentre dans le cadre du projet de réhabilitation de la Route Nationale 44 reliant Marovoay - Vohidiala du Pk 74+500 au Pk 88+000. Les Infrastructures routières et les ouvrages de franchissement sont en mauvais état. Les routes sont impraticables voire même coupées pendant une partie de l'année à cause de l'ensablement et des glissements ou éboulements particulièrement à la suite de fortes précipitations pendant les saisons de pluie ou pendant les périodes cycloniques.

Pendant la période de pluie intense, cette coupure est caractérise par une inondation totale de quelques tronçons dits submersibles et une accumulation boueuse dans les sections non submergées.

Pour résoudre ces problèmes, notre contribution consiste à proposer des solutions d'ordre géotechniques. Nos objectifs visent d'une part à cerner le site du point de vue géologique, géomorphologique, hydrologique et hydrogéologique en vue d'appréhender les problèmes, d'autre part à une détermination des caractéristiques géotechniques du sol en place et des matériaux qui serviront de guide vers une spécification technique des travaux afin de proposer des solutions durables. Ainsi nous avons proposé une multitude de solutions à adopter pour remédier les problèmes susmentionnés. Le présent mémoire s'intitule «Recherche de matériau et choix des moyens de mise en œuvre pour la résolution des problèmes géotechniques de la RN 44, pk 74+500 au pk 88+000, dans la plaine de Mangoro-Ankay, Centre de Madagascar ».

Ce travail commence par une compilation bibliographique qui se base sur la réinterprétation des données et des cartes en relation avec le projet, puis une campagne de terrains (incluant des levers géologiques et topographiques, des études pédologiques, visites de carrière, échantillonnage, mesure in situ, etc.) et la préparation des échantillons (travaux de laboratoires suivis de l'exploitation des données) jusqu'à la rédaction finale.

Le rapport comporte trois chapitres, mis à part l'introduction générale, la conclusion générale et les références bibliographiques.

Le premier chapitre traite l'étude préliminaire du projet de réhabilitation essentiellement en deux grandes lignes. Un cadrage général de la zone d'étude par la

réinterprétation des études bibliographiques qui nous conduit à la présentation des travaux effectuées et des problèmes rencontrés le long de l'axe.

Le second chapitre est axé sur une étude géotechnique de l'ouvrage projeté qui comprend une définition des travaux de terrassement, une étude sur la chaussée et des matériaux utilisés dans le cadre de l'étude.

Le troisième chapitre est une proposition de solutions pour avoir une route praticable durant toutes les saisons de l'année. D'abord par les mesures à prendre, face aux problèmes qui s'imposent dans la zone d'étude puis la contribution de la géotechnique dans la mise en œuvre et le contrôle des travaux.

CHAPITRE I :

ETUDES PRELIMINAIRES DU PROJET DE REHABILITATION

L'objectif est de délimiter l'axe d'étude dans son environnement naturelle en vue de définir les problèmes qu'elle subit et aussi une étude technique des travaux à réaliser et des ressources en matériaux utile pour le projet de réhabilitation.

I.1. CONTEXTE ADMINISTRATIF ET GEOGRAPHIQUE

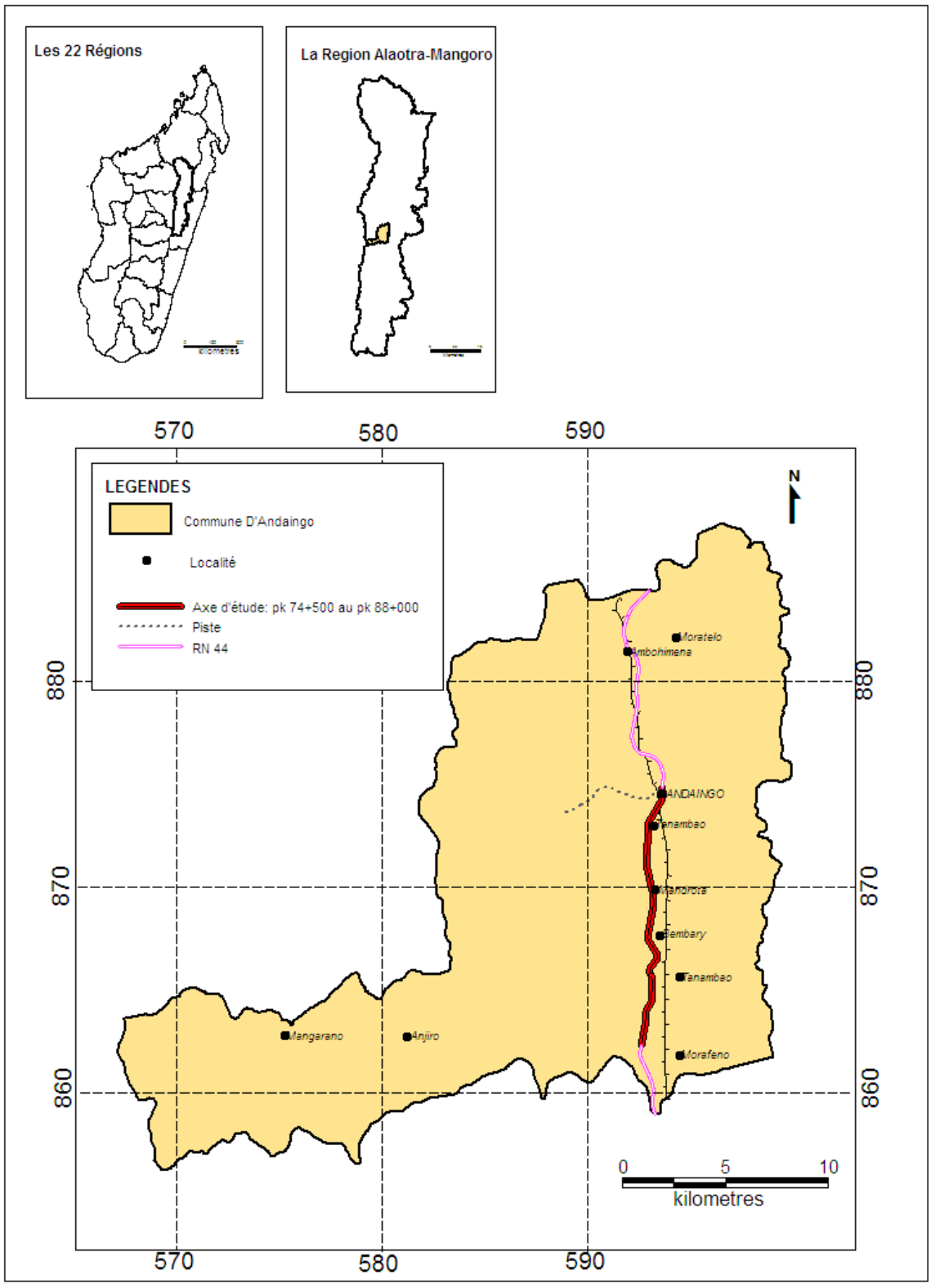
I.1.1. Situation administrative de la zone d'étude

Notre zone d'étude se situe entre 565 et 610 Km de latitude Sud et 857 à 896 Km de longitude Est. Elle appartient à la région Alaotra Mangoro, au district de Moramanga, commune d´Andaigo (Figure 1).

La Commune Rurale d'Andaingo couvre une surface d'environ 48500ha, soit 9% de la Sous-préfecture et est limitée administrativement (GESFORCOM, 2010):

- au nord par la Commune Rurale d'Andilanatoby-District d'Ambatondrazaka
- à l'ouest par la Commune Rurale de Tanambao Besakay-District d'Ambatondrazaka
- au sud- ouest par la Commune Rurale d'Ambongamarina- District d'Anjozorobe
- au sud par la Commune Rurale d'Amboasary Gare- District de Moramanga
- à l'Est par la Commune Rurale Didy- District d'Ambatondrazaka.

L'étude concerne le tronçon de la route nationale 44 limité par les points kilométriques 74+500 et 88+000 (marqué en rouge dans la Figure 1), classé dans la section 3 selon le découpage en sections homogènes établi lors des études d'avant projet détaillé du projet de réhabilitation de la RN 44 entre Marovoay-Vohidiala.



Source : BD 100 FTM

Figure 1: Situation administrative de la zone d'étude

I.1.2. Situation Géographique

- ***Climat***

Le climat est identique à celui de la partie Haute Mangoro, sous l'influence de l'alizée du Sud Est où le nombre de mois biologique sec est inférieur à 2 (ONE, 2009). Les précipitations annuelles sont de 1500 à 2000mm avec des brumes toute l'année et un hiver de pluies fines et fréquentes. L'évaporation annuelle est de 500 à 600mm. La température varie de 20° à 25° C (Ramasiarinoro, 2008).

Classée dans la région climatique humide mésothermique, on enregistre une précipitation en 24 heures décennale de 100 à 150 mm. L'évapotranspiration potentielle est voisine de 1000 à 1100 mm tandis que l'évapotranspiration réelle est de 800 à 900 mm soit 70 à 80% de l'ETP.

- ***Végétation***

L´axe routier traverse en grande partie des rizières et des zones reboisées entre Bembary et Tanambao (Figure 2). On y rencontre des arbustes tels que les eucalyptus, les pinus, etc., étendus sur un vaste plateau de basse altitude. Le type de sol issu de la formation géologique, la géomorphologie et l'hydrographie sont toutes favorables à la mise en place des cultures de riz, principales activités économiques de la région. L'ensemble de la commune rurale est riche en couverture végétale.

Le tableau suivant nous donne la répartition spatiale des formations végétales dans la Commune Rurale d'Andaingo.

Tableau 1: Surface et taux de répartition des unités au sol dans la Commune rurale d'Andaingo

Type d'occupation	Superficie (ha)	Pourcentage
Forêt dense	41	0,1
Savane herbeuse	22820	47,1
Rizière	14450	29,8
Zone reboisée	9369	19 ,3
Savane arborée	1791	3,7
Superficie totale	48471	100

Source: *GESFORCOM, 2010*

La formation graminéenne occupe la plus grande partie de l'espace :

Les savanes ou prairie à Aristida qui est une formation herbacée non stratifiée caractérisée par des graminées telles que: *Aristida sp., Imperata sp., Hyparrhenia sp., Loudetia sp., Paspalum conjugatum, Panicum maximum, Heteropogon sp*. Ce sont des végétations envahissantes, très sensibles au feu, et pauvres en faune (GESFORCOM, 2010).

Les zones de reboisement sont de différentes sortes

Les boisements d'Eucalyptus :

C'est la couverture végétale ligneuse la plus dominante constituée surtout par des espèces d'Eucalyptus (*Eucalyptus robusta, Eucalyptus grandis, Eucalyptus torquata*, etc., cette formation se rencontre généralement dans presque toute la région centrale de Madagascar et dans une moindre mesure la région orientale en remplacement de la végétation originelle par reboisement. La forêt d'Eucalyptus est plus ou moins résistante, vu que sa régénération est relativement facile même après un passage du feu de brousse (GESFORCOM, 2010).

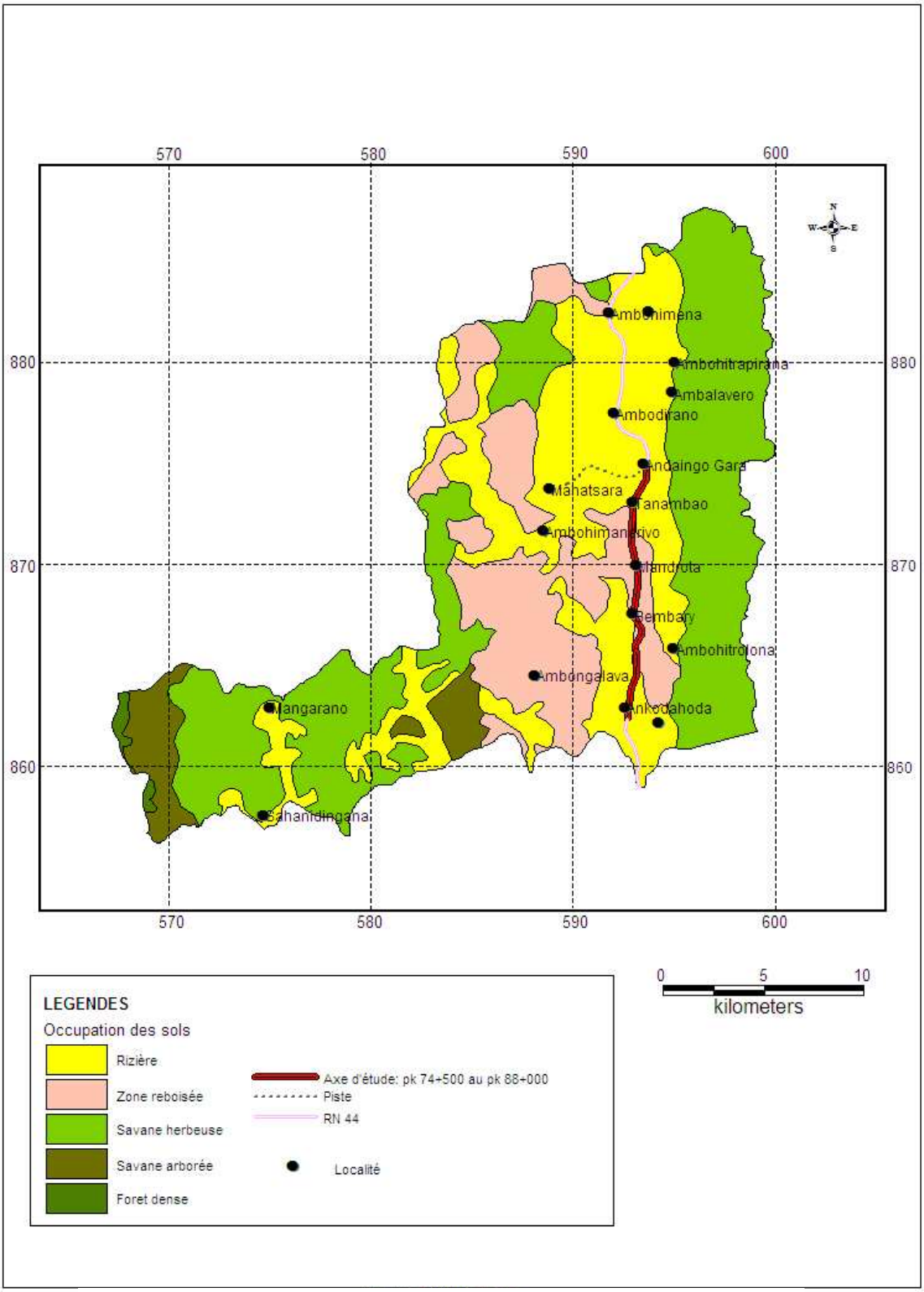
Les boisements de Pinus :

C'est une formation ligneuse utilisée pour le reboisement à Madagascar. Elle est constituée essentiellement par les espèces *Pinus khesya, P. ellotii*et *P. patula*. Cette formation mono stratifiée, ne présentant pas de sous-bois, est très abondante dans les environs d'Ambatondrazaka. Elle est également sensible au feu, due à la présence de résine facilement inflammable à l'intérieur du bois de pins (GESFORCOM, 2010).

Les cultures et plantations :

En dehors des formations naturelles et des zones de reboisement, on rencontre surtout des zones de cultures et de plantations qui varient suivant les endroits et les saisons :

- Dans les bas-fonds, on a saisonnièrement le riz ;
- Sur les alluvions, les sols colluvionnaires et les bas de pente aux sols ferralitiques, on trouve sur tout les cultures pluviales : manioc, patate douce… ;
- D'autres types de cultures vivrières telles que haricots, patates, maïs ainsi que des arbres fruitiers sont localisés aux environs des villages ;
- Les plantations sont constituées surtout par des jardins de case où l'on trouve des arbres fruitiers et des caféiers (GESFORCOM, 2010).



Source : BD 500 FTM

Figure 2: Carte d'occupation des sols de la Commune d'Andaingo

I.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La figure consignée ci-dessous (Figure 3) montre que la route traverse des alluvions récentes et des dépôts lacustres du Néogène de l´Alaotra-Mangoro avec, en quelques endroits, des sables blancs. L´ensemble repose sur la migmatite de Mangoro du système de graphite (Lautel, 1953).

La vaste zone alluviale encore en majeure partie à l'état de marécage pourrait être transformée en rizière et en terrain fertile.

Les dépôts lacustres sont représentés par les alluvions lacustres du couloir dépressionnaire du Mangoro, les sables blancs et les sables jaunes. Ce sont des formations de sables plus ou moins argileux, de sables fins et d'argiles sableuses. Les sables blancs constituent parfois des surfaces considérables avec des épaisseurs variant de 0,50m à 1 m. Des rares sables jaunes proviennent du démantèlement des hautes terrasses toujours très quartzeux, formations parfois très minces (Bésairie, 1961).

La série de Mangoro est formée de migmatite sans graphite, de migmatite à biotite ou à amphibole avec des niveaux à grenat. On note l'abondance de ferromagnésiens, la sillimanite est rare, et le graphite absent. Ces migmatites, marquées parfois par une schistosité nette et continue, sont à grains fins. Quelquefois, ils sont localement plus ou moins rubanés avec alternance de lits micacés ou amphiboliques et de rares lits quartzo feldspathiques. Les migmatites se trouvent généralement dans un état d'altération superficielle très poussée, mais souvent visibles et bien conservés dans les lavaka où elles affleurent sous 5 à 10m de latérite (Bésairie, 1961).

Les affleurements géologiques sont rares à cause de l'épaisse couche latéritique qui couvre l'ensemble de la zone. Une série de sondage exécutée dans les environs de l'axe routier au droit des appuis pour les ouvrages de franchissement montre que l'axe en question se repose sur une série de couches argileuses à sable argileuse. L'observation in situ montre aussi la présence d'une épaisse couche de sable sur l'axe et ses environs.

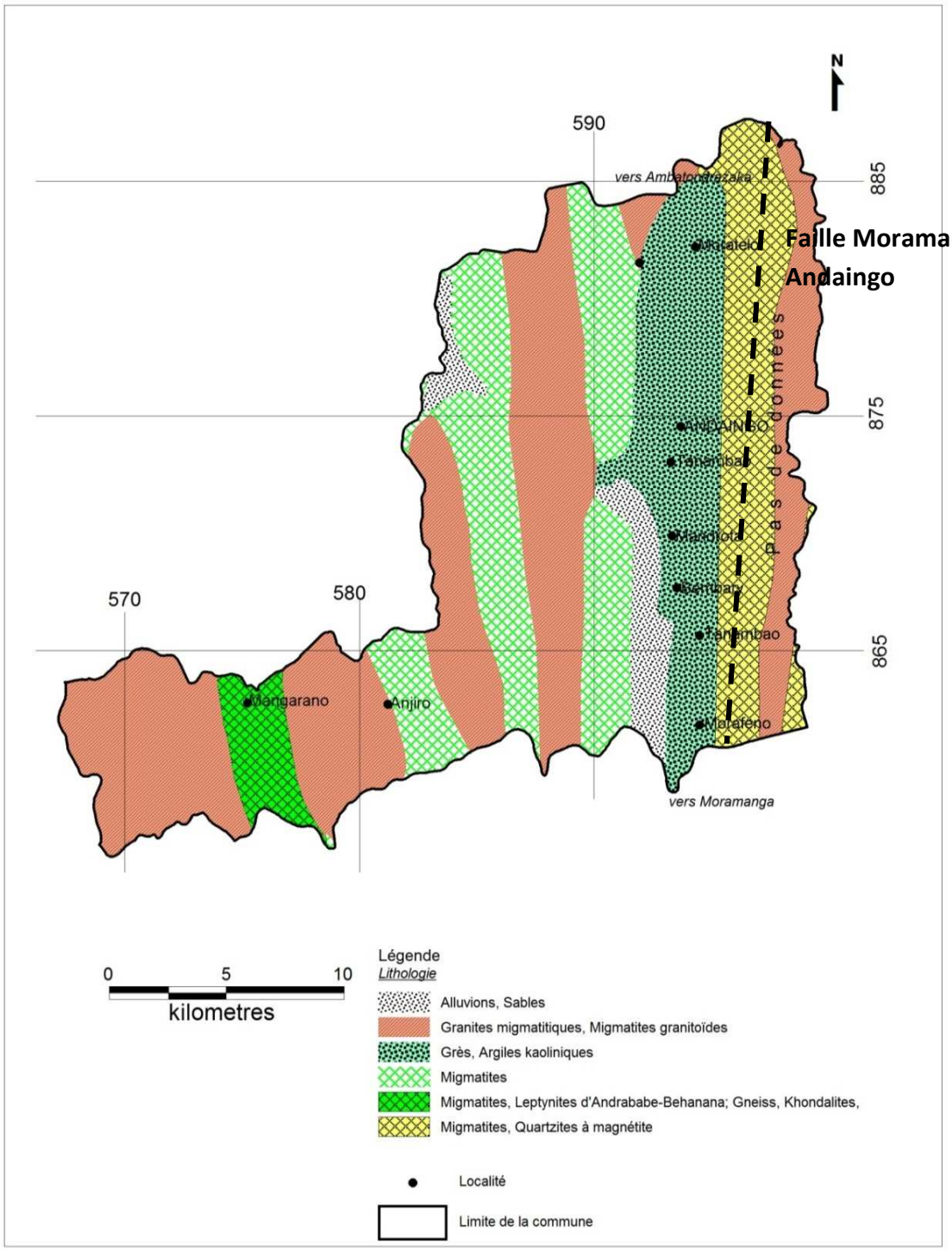
La série du Manampotsy est constituée par des formations essentiellement gneissiques légèrement migmatitiques à graphite et grenat et du gneiss à pyroxène. On note la présence de gneiss à biotite parfois associé à des micaschistes à biotite.

Des granites sont intertratifiés dans ces 2 séries. Le premier type est une formation leucocrate à grain moyen ou grossier, montrant une schistosité assez nette et discontinue

qui tend parfois à disparaitre. Ce type de granite, à relief assez élevé, est pauvre en ferromagnésien et occupe une surface assez considérable et se manifeste sous une forme de grande lame concordante aux migmatites. Le second granite est de type Angavo est essentiellement migmatitique à très rare biotite ou amphibole, leucocrate, à grain fin, moyen ou grossier. Cette formation occupe la zone occidentale boisée d'Andaingo (Bésairie, 1961).

Des amphibolites et des charnockites affleurent dans les formations de la série du Mangoro et dans les granites interstratifiés.

Du point de vue structural, la zone d'étude se trouve dans le fossé d'effondrement Alaotra-Mangoro, un petit rift intra-continental effondré au milieu du socle cristallin. Sur le côté droit de l'axe (Moramanga vers Ambatondrazaka), on remarque la présence d'une structure de direction Nord-Sud. Les études bibliographiques et cartographiques montrent qu'il s'agit d'un escarpement de faille. En effet, on observe certains linéaments avec des lignes de crête suivant une direction générale Nord-Sud. Cette dernière est la faille « Moramanga-Andaingo » qui se prolonge jusqu'à Alaotra. Cette faille serait en relation directe avec l'ancienne faille du Mangoro qui aurait entrainée un basculement de la zone effondrée vers l'Est et le Nord Est (Bourgeat, 1972).



Source : BD 500 FTM

Figure 3: Carte géologique de la Commune d'Andaingo

I.3. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

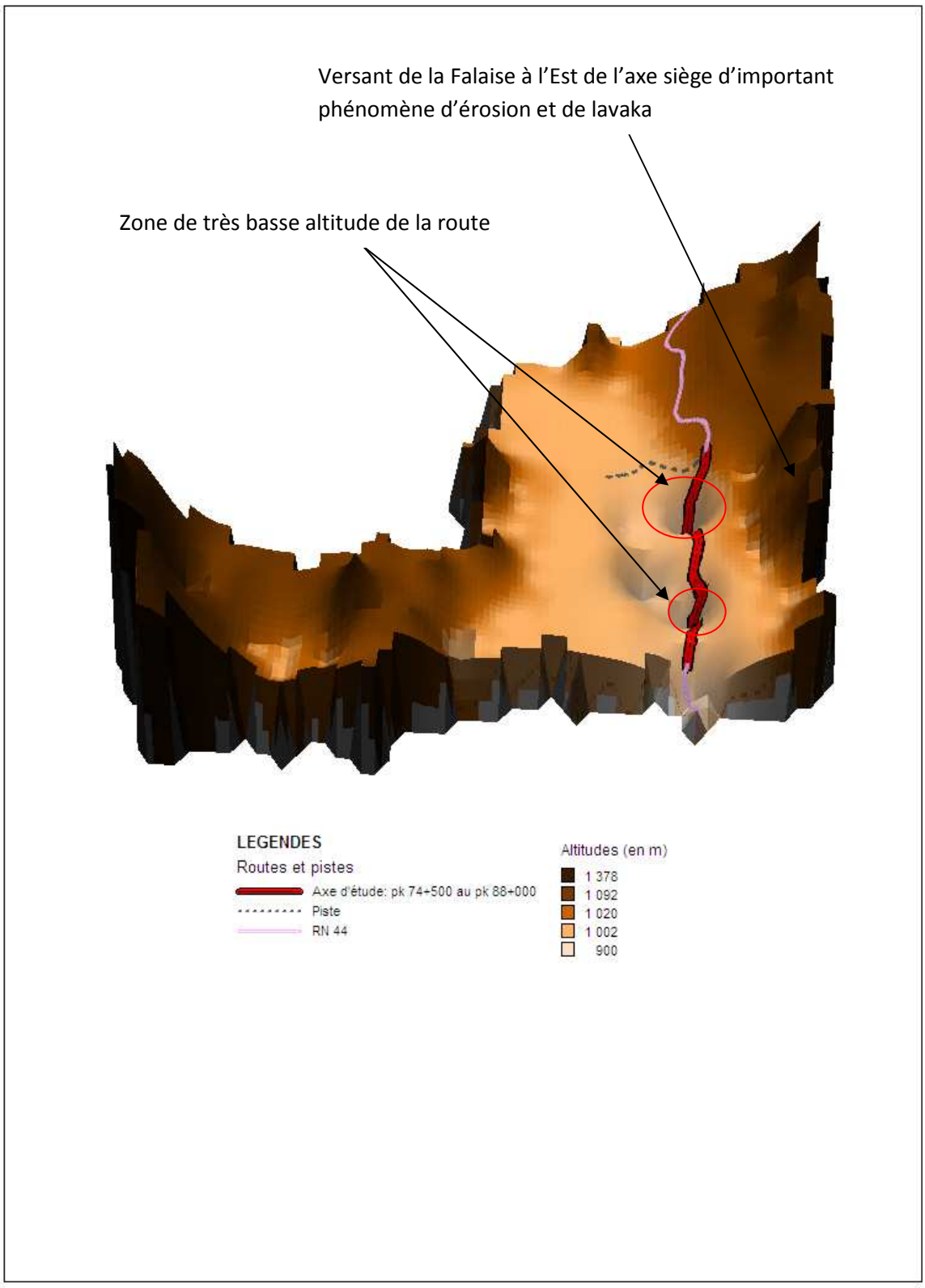
La géomorphologie représente un moyen de décrire un paysage et son évolution. Elle est associée aux phénomènes d'altération, de transport par l'eau et des agents climatiques d'érosion. La résistance des affleurements aux facteurs climatiques d'érosion est la base de l'évolution morphologique d'une région (Levêquer, 1983).

La région est limitée par la falaise de l'Angavo à l'Ouest et la falaise de Betsimisaraka à l'est. La région se présente ainsi comme une cuvette surmontée par des escarpements de montagnes (ONE, 2009). On note aussi un alignement des crêtes de montagnes suivant une direction Nord-Sud. Les versants des reliefs sont formés par des sols latéritiques très friables et épais, sièges d'importants phénomènes d'érosion et de lavakisation.

La zone d'étude se trouve dans une cuvette plate où l'on rencontre par endroits des petites collines avoisinant les 1000m d'altitude. Le profil en 3 dimensions (Figure 4) montre que l'axe routier traverse un plateau d'altitude proche des 900 à 920m, à la portée de l'influence du fleuve ; ce qui favorise la riziculture, principale activité dans la zone. La plupart des versants est parfois marquée par une érosion active du type lavaka. Les produits d´érosion issus de ce phénomène provoquent l'ensablement des rivières et des zones de basses altitudes. Cet ensablement constitue l´un des problèmes rencontrés le long de cet axe (Egisbceom, 2009).

Du point de vue topographique et structurale, cette partie se trouve dans une zone de très basse altitude entourée par des falaises de part et d'autre de l'axe de la route favorisant ainsi l'accumulation d'eau, des débris provenant de l'érosion des versants et aussi la remontée de l'eau, entraînant l'inondation et l'ensablement.

L'insuffisance de matériaux rocheux est un des problèmes rencontrés à cause du contexte géologique du milieu.



Source : BD 500 FTM

Figure 4: Profil en 3D de la zone d'étude

Dans la zone, les deux falaises se rapprochent et le relief présente un aspect "polyédrique" avec des dénivellations importantes (50 à 100m) entre les crêtes et les

talwegs. La topographie est homogène, caractérisée par des versants à pente forte de plus de 50% en général, et des dépressions marécageuses occupent du Nord au Sud le revers des escarpements (GESFORCOM, 2010).

La morphologie de la région est marquée par l'abondance des formes laissées par l'érosion visible le long des versants qui longent la route. L'altitude dans la zone d'étude est relativement basse favorisant l'accumulation des éléments en provenance des versants et l'ensablement des rivières et de la route. Les risques d'inondation sont élevés dues à la remontée du fleuve Mangoro en période de crue élevée.

I.3.1. Erosion

Elle se définit par le départ des éléments sous l'action d'agents de transport tels que l'eau ou le vent. Dans notre cas, on ne parlera que de l'action de l'eau.

En fonction de la localité, du climat de la végétation et du type de sol, les formes laissées par l'érosion restent variées. Dans la plupart des cas, l'érosion se manifeste sous 2 formes : l'érosion superficielle et l'érosion à évolution rapide sous forme d'excavation profonde à paroi verticale. L'érosion des sols est particulièrement intense dans le secteur d'Andaingo. Des ruissellements concentrés, des lavakas entaillent les flancs des versants. Les terres déplacées viennent ensabler les zones basses. De même, des parcelles de culture, sont abandonnées à cause de la perte des terres arables. La maîtrise de l'érosion par la bonne gestion de la végétation et par l'adoption des techniques de conservation des sols constitue une avancée dans le domaine de la conservation des Ressources Naturelles Renouvelables (GESFORCOM, 2010).

I.3.2. Ensablement

L'érosion superficielle sur les pentes latéritiques se manifeste par des déplacements des horizons de sol. Il en reste alors de petites particules de quartz et de débris végétaux témoignant le transport des particules par le ruissellement. Ce sont ces débris qui contribuent aussi à l'ensablement des zones de dépression.

Le principal facteur de l'ensablement est l'érosion. Parmi les zones affectées par ce phénomène, notre zone d'étude fait partie des sites les plus touchées (ONE, 2009).

I. 3.3. Formation des lavakas

Les lavakas constituent les formes les plus spectaculaires de l'érosion accélérée à Madagascar. Ce sont des formes très répandues dans le versant Est de Madagascar.

Par définition, ce sont des ravins à paroi abrupte qu'on trouve au bord des plateaux latéritiques comportant une cavité ovoïde ou lavaka proprement dit et un couloir de sortie en pente douce (Lautel, 1953).

Ils prennent naissance sur les bords des plateaux constitués par des formations riches en feldspath recouvert par une arène de décomposition de quelques mètres d'épaisseur surmontée par un plateau épais d'argile latéritique. On aperçoit d'abord des fissurations qui favorisent la circulation et l'infiltration de l'eau à l'intérieur, diminuant la cohésion. La discontinuité qui existe entre les formations imperméables telles que les granites, les migmatites et les gneiss en dessous des formations latéritiques accentue la circulation de l'eau. Au fur et à mesure que l'eau circule, il y a agrandissement de la fissure dans le versant puis effondrement consécutif du manteau d'argile latéritique provoquant en profondeur un vide dans l'arène en décomposition. La présence d'une nappe entraine le départ des particules fines important qui, par la suite, se développe en vide assez grand ; entraînant un effondrement vertical et une formation de lavaka. Les éléments ainsi effondrés seront ensuite transportés par l'eau qui sort au pied de la paroi du lavaka et contribueront à l'ensablement des rivières en aval.

Les lavakas constituent une des caractéristiques sources de désordre le long de l'axe surtout dans la partie nord. On remarque déjà l'abondance de cette forme à Andaingo et au versant des reliefs qui longent le côté Est de cet axe (figure 5).

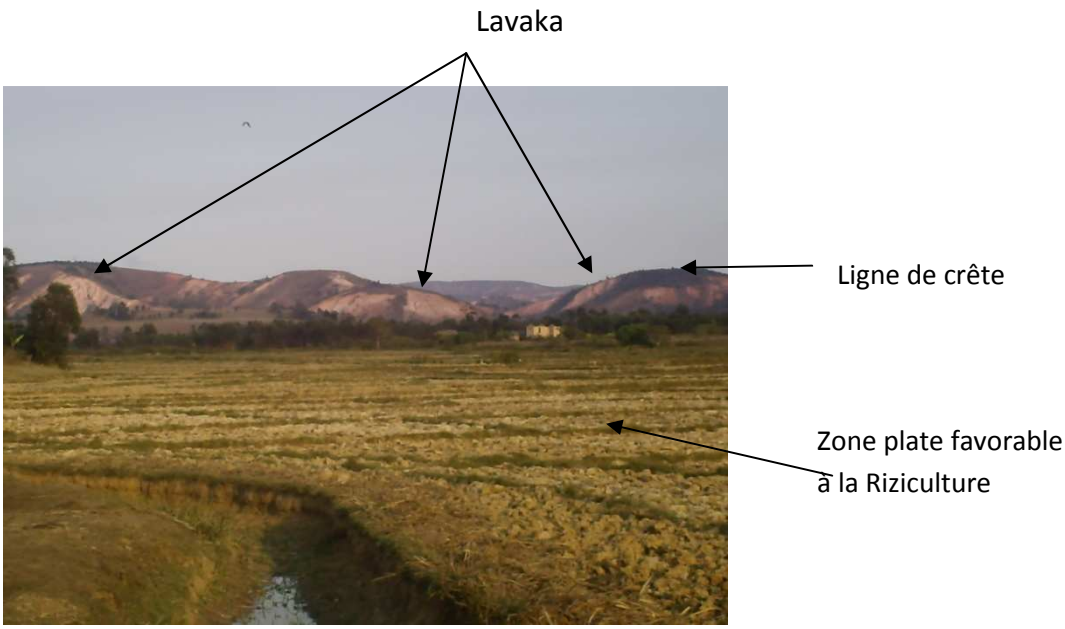


Figure 5: Caractéristique morphologique de la région

I.4. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE

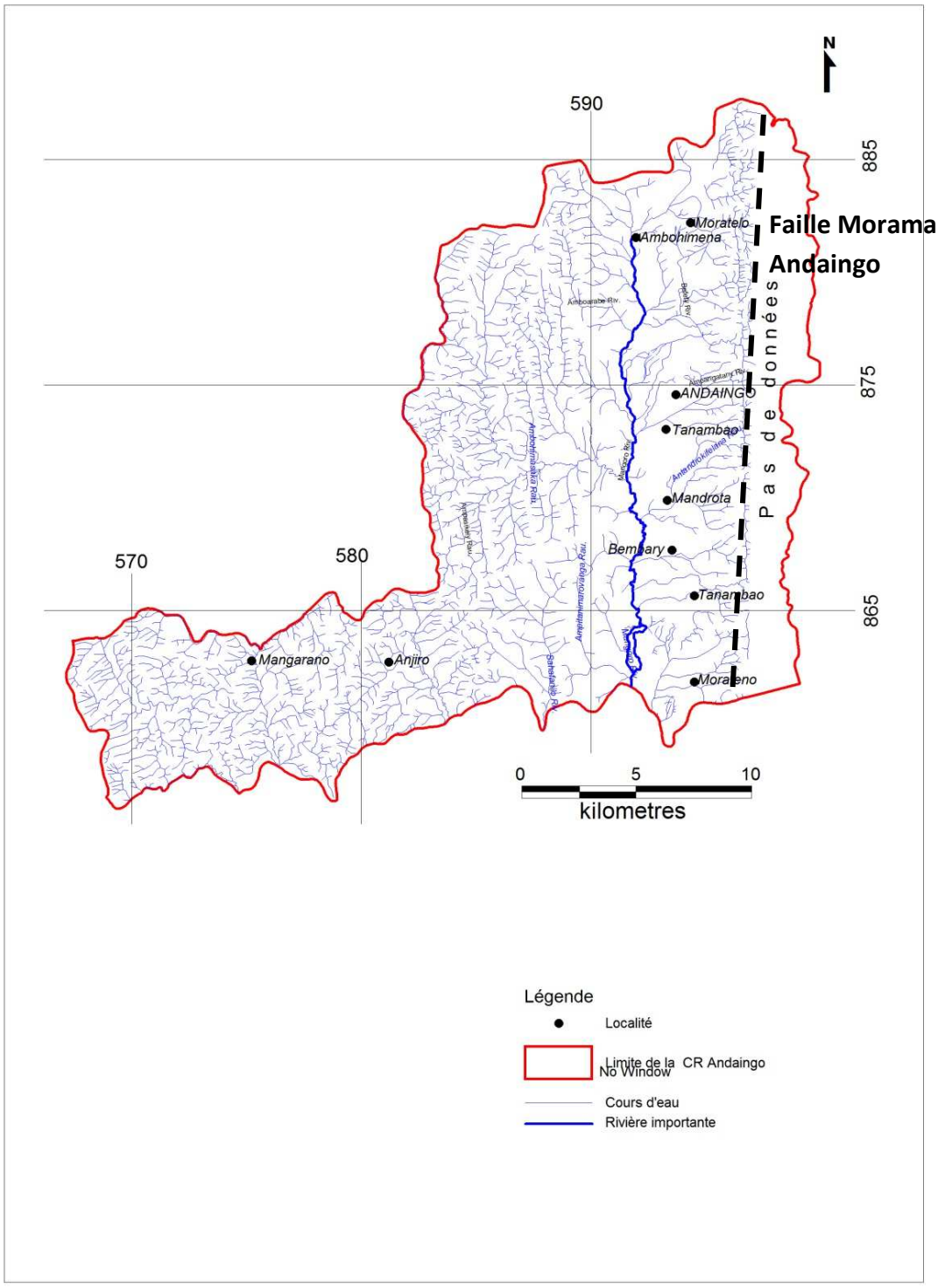
La zone en question est fortement sous l'influence du fleuve Mangoro *(Figure 6)*. Des zones marécageuses sont alimentées par le fleuve en question. La route traverse souvent des affluents du grand fleuve par d'ouvrages de franchissement assez nombreux dans la région.

La zone étudiée se trouve dans le grand bassin hydrologique du Mangoro (Ramasiarinoro, 2008) [16]. Dans les zones dépressionnaires comme la commune d'Andaingo et ces environs, l'écoulement annuel est souvent inférieur à 500 mm et on enregistre une crue de 120 à 300 l/s/km^2 (Chaperon et al, 1992).

Les enquêtes ainsi que les travaux de terrain menés dans quelques villages (Bembary, Andranomadio, Mandrota) nous ont conduit à la conclusion que la profondeur de la nappe dans cette zone varie en moyenne de 5 à 8 m. Plus on s'éloigne du fleuve, plus cette profondeur devient importante ; ce qui montre nettement l'influence du grand fleuve sur la zone. La proximité entre l'axe et le fleuve a favorisé l'inondation dans quelques parties de la route notamment à l'entrée du village de Mandrota. Au droit des appuis pour les ouvrages de franchissement, on a constaté que la nappe phréatique est visible juste à moins de 2 m du sol. Actuellement on y a installé un radier en béton armé submersible et permettant ainsi le déplacement des biens et des personnes.

La carte hydrographique de la zone montre bien les structures hydrographiques dominantes et la dominance du grand fleuve sur l'ensemble de la région (Figure 6).

D'après la carte, on observe directement l'abondance de cours d'eau et de fleuves. On constate aussi que la structure du réseau hydrographique dans la zone d'étude en général semble suivre sa configuration structurale. Elle suit aussi une direction Nord Sud avec de nombreux affluents qui s'éparpillent perpendiculairement de part et d'autre du collecteur principal (fleuve Mangoro) témoignant un rift intracontinental. Il s´agit d´un réseau hydrographique en treillis.



Source : BD 100 FTM

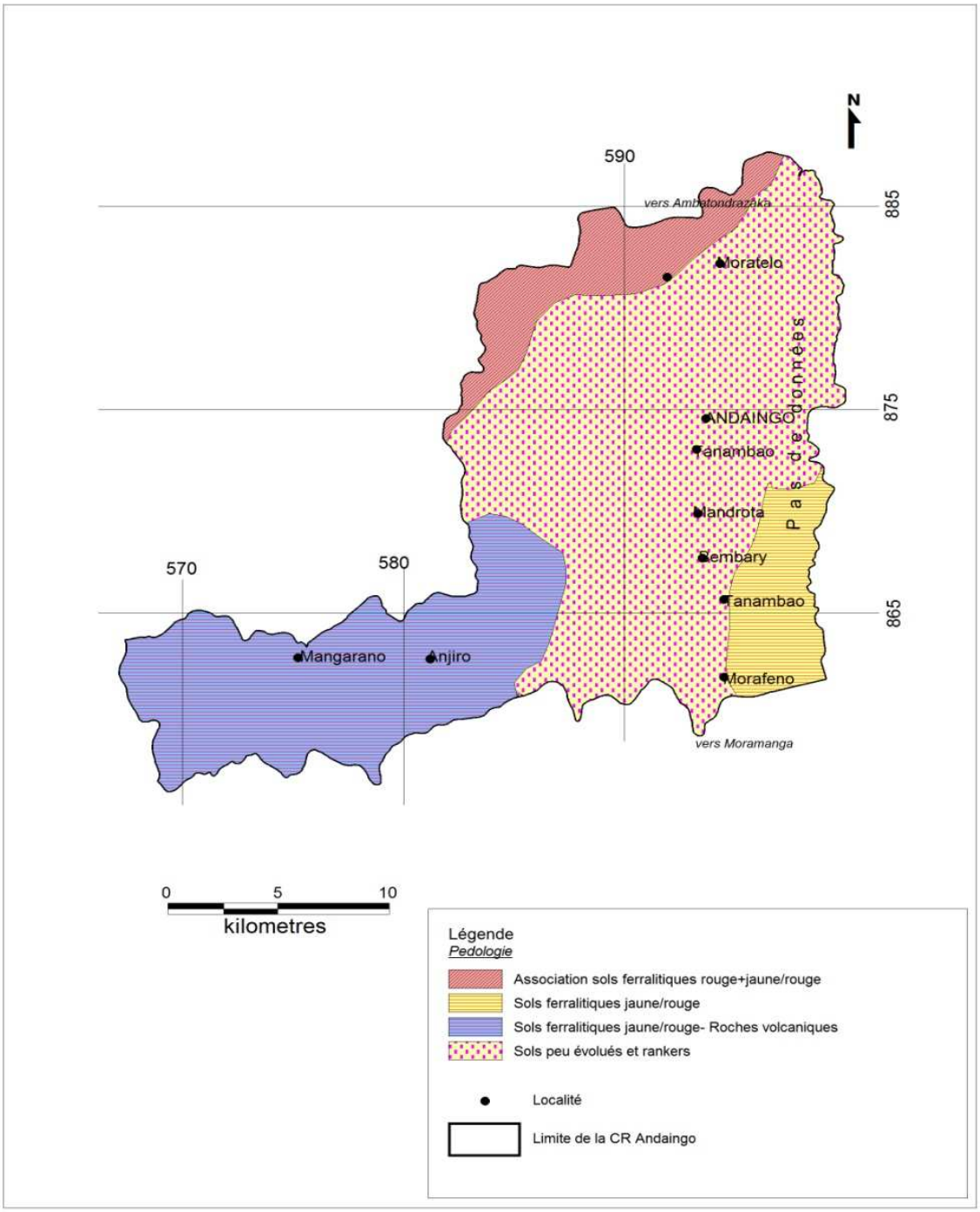
Figure 6: Carte hydrographique de la Commune d'Andaingo

I.5. CONTEXTE PEDOLOGIQUE

Nous nous trouvons dans les zones d'abondances des couvertures végétaux et ou le sol est du type ferralitique. Les sols sont les marques du climat caractéristique de la région ; on a des sols rouges et des sols jaunes sur rouge typiques des régions tropicales chaudes et humides. L'altération chimique du substrat géologique est très poussée et entraîne une importante épaisseur du sol.

Les sols de type ferralitique provenant de l'altération des formations in-situ sous climat tropical offrent des horizons d'accumulation qui pourront être utilisées comme matériaux dans la construction routière, par exemple pour couche de fondation à condition d'être conforme à la norme imposée dans le domaine. Les sols ferralitiques sont des sols riches en hydroxydes de fer et en hydroxydes d'alumine. Ces sols se forment sous couvert forestier et en climat tropical.

Les formations géologiques qui existent dans le secteur sont moins visibles à cause de l'épaisse couverture latéritique diminuant le nombre de carrière exploitable pour matériaux rocheux dans le site. Par contre les matériaux meubles y sont nombreux mais rarement utilisables comme couches de fondation. Ceci est dû probablement au stade d'évolution des sols qui constituent le secteur. La figure 6 montre que le long de l'axe on est en présence de sol peu évolué qui s'étend sur toute la surface de la zone plate. Ce type de sol repose sur un substratum fortement décomposé, la migmatite du Mangoro.



Source : BD 500 FTM

<u>Figure 7</u>: Carte pédologique de la zone d'étude

Les couleurs des sols observés sont les conséquences de la présence en quantité notable de fer (rouge) et d'alumine (jaune). Ceci est dû à la présence des minéraux tels que la gibbsite et la kaolinite.

Dans les sols « rouge » ou « jaune sur rouge » observés sur les reliefs migmatitiques sur abaissés, il y a une accumulation des résidus d'altération gibbsitiques. Les sols ferralitiques « jaune sur rouge » sont riches en minéraux peu altérables et s'apparentent le plus aux sols formés sur les sédiments lacustres ou fluviatiles anciens (Bourgeat, 1972). Ils sont observés uniquement dans des sites privilégiés témoins d'aplanissement épargnés par les reprises d'érosion récente. Ce genre de sol est typique du versant oriental, surtout sur des reliefs de rajeunissement d'anciennes surfaces. La roche mère n'affleure jamais en surface et la teneur en éléments fins est plus faible (moins de 20% pour quelques échantillons) que dans les horizons intermédiaires ; parallèlement, la teneur en quartz et sable y est plus forte. Les sols peu évolués sur lesquels la route est construite se situent sur un substratum constitué par des roches fortement décomposées comme la migmatite. Du point de vue climatique, les sols « rouges » (peu désaturés) ne s'observent que dans la zone soumise à une longue saison sèche. Les sols « jaunes sur rouges » moyennement désaturés sont caractéristiques des régions humides de l'Est (Fourgeat, 1972).

I.6. CONTEXTE ECONOMIQUE

La zone d'étude jouit d'un important atout du fait des conditions imposées par la topographie et l'hydrologie. Elle profite de l'existence des plateaux cultivables offrant une grande possibilité de la mécanisation agricole, un vaste pâturage favorable à l'élevage, une pluviométrie et une température appropriés à la production agricole. Cependant le système ou le moyen d'exploitation de ces potentiels reste le plus souvent la méthode traditionnelle à cause des coûts assez élevés de la technologie appropriée. L'ensemble est propice aux cultures vivrières (céréales, maniocs, arachides, etc.) aux cultures de rente (cafés, litchis, etc.) et aux cultures industrielles (raphia, cannes à sucres, etc.) (ONE, 2009).

En dehors de l'agriculture, l'économie forestière par l'exploitation des plantations d'Eucalyptus constitue une des principales activités économique de la Commune. Par ailleurs, le passage de la RN 44 entraîne la prospérité de l'hôtellerie à Andaingo (GESFORCOM, 2010).

L'élevage bovin est moins extensif mais lié aux travaux agricoles et destiné à la boucherie. Les pâturages sont limités du fait des reboisements et des forêts, les bœufs restent ainsi en semi-liberté à proximité des villages. En contre-saison, ils peuvent brouter les repousses de riz. L'élevage laitier est peu développé (GESFORCOM, 2010).

I.7. CONCLUSION PARTIELLE

L'altitude joue un rôle important dans la venue d'eau sur la chaussée et tous les éléments de la chaussée. Les infrastructures routières dans les zones favorables à l'accumulation d'eau et sujet à des inondations subissent l'agressivité de l'eau. Or, les désordres que subissent ces infrastructures sont les conséquences de l'activité de l'eau.

La présence de discontinuité entre les différentes formations géologiques constitue des zones de moindres résistances favorables à la circulation d'eau qui est le principal moteur des mouvements de terrains ou des déplacements d'une certaine quantité de sédiment. Ces déplacements peuvent être à l'origine des coupures de la route ou de la destruction des ouvrages accessoire de la chaussée.

La route reste la principale voie de communication où tous les produits agricoles de la région sont évacués pour alimenter les grandes villes. Avoir une route en bonne état permettrais de diminuer le prix des produits agricoles et surtout du riz qui fais la renommée de la région. Une diminution considérable des attaques à main armée si rependue dans certains partie le long de l'axe et une échange culturelle, technique et technologique entre les districts de la région et de ces environs. Ainsi, on a une augmentation du niveau de vie et de connaissance des habitants de la région.

I.8. SITUATION TECHNIQUE DE LA ROUTE

Selon le découpage en sections homogènes établi lors des études d'avant projet détaillé, dans le cadre du projet de réhabilitation de la RN 44 entre Marovoay et Vohidiala, cette axe de 113 km est divisée en 4 sections. Le tableau nous donne les détails de ce découpage.

Tableau 2: Découpage en section homogène de la RN44 entre le pk 20 et le pk 133

Section	Origine	Extrémité	Longueur (Km)	Remarques sur le secteur
1	Pk 20 Marovoay	Pk 42	22	Bas et plat, assez loin du fleuve principal
2	Pk 42 Tsarafasina	Pk 61.5	19.5	En crête douce
3	Pk 61.5 Amboasary	Pk 91.5	30	Très bas, plat, inondable et ensablé, proche du fleuve Mangoro
4	Pk 91.5 Ambodirano	Pk 133	41.5	En crête marquée, point le plus haut du tracé, abondances de lavaka
Total	**Marovoay**	**Vohidiala**	**133**	

Source : *Egisbceom, 2009*

Notre étude concernant le lot 1 du pk 74+500 81+000 au pk 88+000. Il est inclus dans la section 3 et caractérisé par des zones à chaussée basse et une route qui longe la rivière Mangoro à de très faible distance.

La route qui nous intéresse a une longueur totale de 13.5 km dont 11 km bitumé et 2.5 km en terre. La chaussée finie aura une largeur de 5.5 m et 1 m d'accotement de chaque côté. Les travaux à effectuer consiste à :

- bitumer le tronçon entre le pk 74+500 au pk 85+805
- aménager la chaussée entre le pk 85+805 au pk 88+000
- construire des ponts en béton armée au pk 77+500, pk 78+500, pk 81+300
- rehausser la digue dans les zones submersibles :
    - pk 77+935 – pk 78+535
    - pk 82+000 à l'entré du village de Mandrota

Pour les zones dites critiques avoisinant la région de Mandrota où la totalité de la chaussée est presque inondée durant la saison de pluie rendant difficile la circulation des usagers, surtout les poids lourds, durant cette saison, il faut :

- construire un radier à l'entrée du village de Mandrota pour faire face au problème d'inondation ;
- construire un réseau d'assainissement (dalots, fossé maçonné)

I.9. ECHANTILLONNAGE

Lors des descentes sur le terrain, nous avons procédé au travail d'échantillonnage pour des analyses au laboratoire qui nous a permis d'obtenir 2 types de prélèvement : les matériaux meubles et les matériaux rocheux.

I. 9.1. Matériaux meubles

Il s'agit de prélever un échantillon de sol par creusement d'un trou de 50 cm x 50 cm et de profondeur en fonction des couches existantes pour l'analyser au laboratoire.

Dans un premier temps, le point de prélèvement est situé par rapport aux références connus (soit des Pk avec en appuis des plans de masse, soit à partir des coordonnées GPS). Ensuite, on trace un carré de 50cm x 50cm sur le point de prélèvement et on enlève la couverture végétale qui s'y trouve. Puis on creuse à l'aide de la brèche jusqu'à avoir une couche homogène, tout en enlevant les débris de terre à l'aide de la pelle. Pour finir, on met le prélèvement dans le sac de 50kg avec une étiquette qui donne les renseignements sur l'échantillon en question.

I. 9.2. Matériaux rocheux

Il s'agit de prélever un bloc de roche en place à l'aide d'un marteau en vue d'un essai de dureté et de performance mécanique au laboratoire.

Une observation de l'affleurement est effectuée en premier lieu. Après on situe le point de prélèvement par rapport aux références connus (soit des Pk avec en appuis des plans de masse, soit des coordonnées GPS). A l'aide du marteau, on prélève des blocs et on met le tout dans un sac avec l'étiquette d'identification de l'échantillon. La Figure 8 ci après nous montre l'emplacement, le nombre d'échantillon récoltée et le type de matériaux.

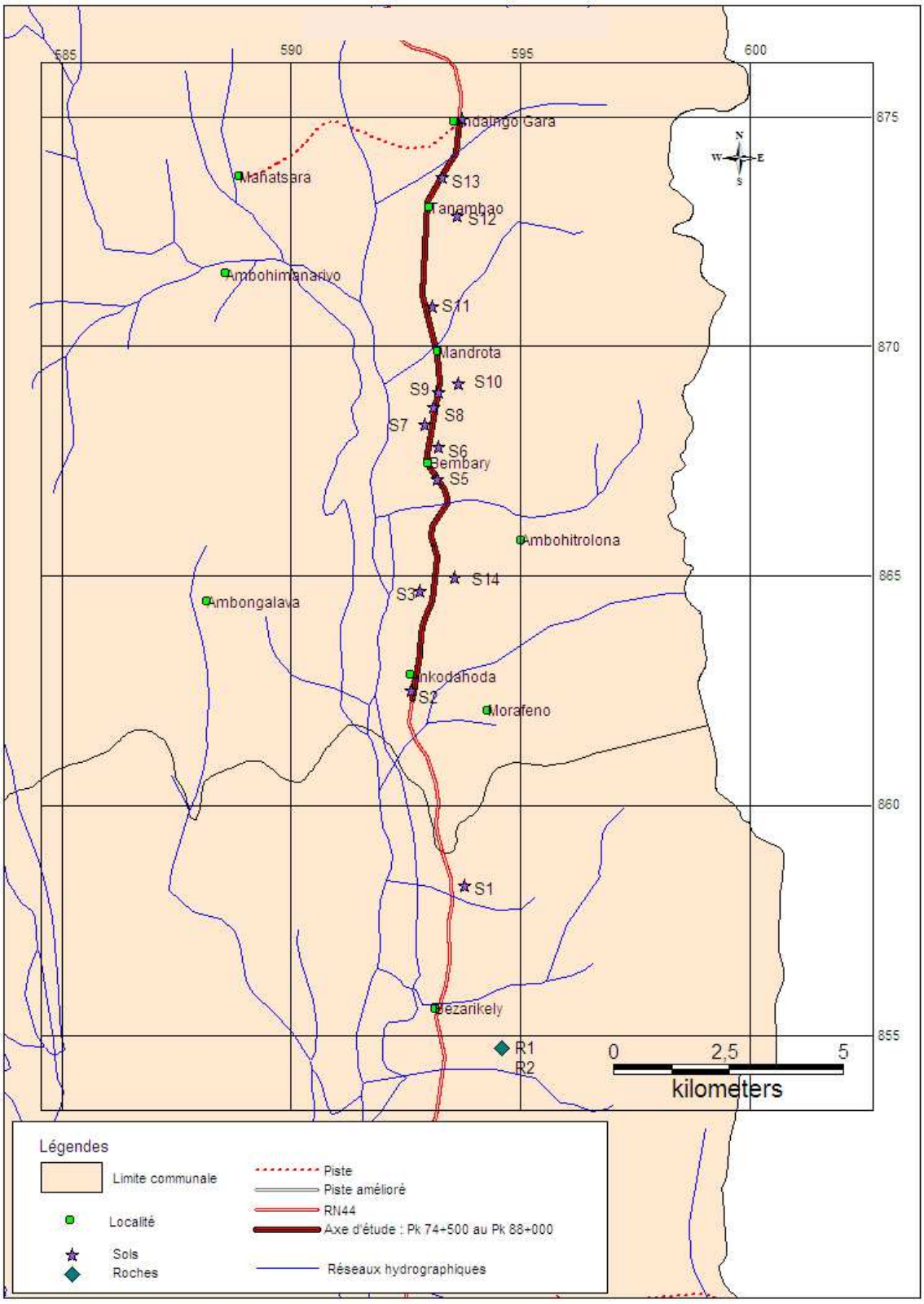


Figure 8: Carte d'échantillonnage

I.10. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE

Un important recouvrement sédimentaire dans la région fait que les formations rocheuses affleurent rarement. Ce qui pourrait causer des problèmes de gisement en matériaux rocheux pour constituer les différentes couches de la chaussée.

La zone se trouve dans une dépression où l'altitude relativement basse à la portée du fleuve Mangoro augmente les risques d'inondation. De plus, tous les débris provenant de l'érosion des versants s'y accumulent et entrainant ainsi des problèmes d'ensablement.

La déforestation et le poinçonnement de la route par les charrues à bœuf favorise l'accumulation de l'eau sur l'axe, créant ainsi des nids de poule. En période de pluie, la route est boueuse tandis qu'en période sèche, elle est peu confortable et poussiéreuse.

Face à ces divers problèmes que le milieu impose, des études géotechniques du site et des matériaux ont été effectuées et discutées dans le Chapitre II, en vue d'orienter le choix dans la technique et le procédé de construction dans le cadre du projet de réhabilitation envisagé.

CHAPITRE II : ETUDES GEOTECHNIQUES

L'objectif des études géotechniques vise à définir :

- les travaux de terrassement ;
- le type de chaussée à adopter;
- l'emprunt et la carrière pour la réalisation des travaux.

II.1. LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT

Les opérations de terrassement consistent à extraire du matériau, à le transporter, et à le placer en remblai ou en dépôt. Au pk 77+935 – pk 78+535, on a une digue en terre qui est constamment inondée en période de pluie intense et le plus souvent difficile d'accès les jours qui suivent. Un départ important des matériaux de la chaussée sous l'action de l'eau qui rompt les liaisons entre les grains est à noter.

Les travaux de terrassement consistent ici à un remblayage de cette portion de la route pour éviter que la chaussée baigne dans l'eau et perd toute sa performance mécanique.

II.1.1. Etude du risque de tassement du remblai

Pour la mise en place d'un remblai, une étude du risque de tassement du remblai doit être effectuée. Il est nécessaire d'établir une coupe géotechnique du terrain pour comprendre le comportement mécanique des sols en profondeur et du matériau pour remblai.

La figure 9 montre que l'on n'a pas de couche compressible qui pourrait rompre la stabilité de l'ouvrage en surface. D'autant plus que le remblayage prévu est de faible épaisseur (35 cm) effectué en 2 temps pour le rendre bien compacte et imperméable. Les risques de tassement est de moins en moins probable parce que la route n'est pas très souvent sollicitée car le trafic est faible avec une moyenne journalière annuelle par sens par voie des véhicule de charge utile supérieure ou égale à 5 tonne de 195 (MTPM, 2010).

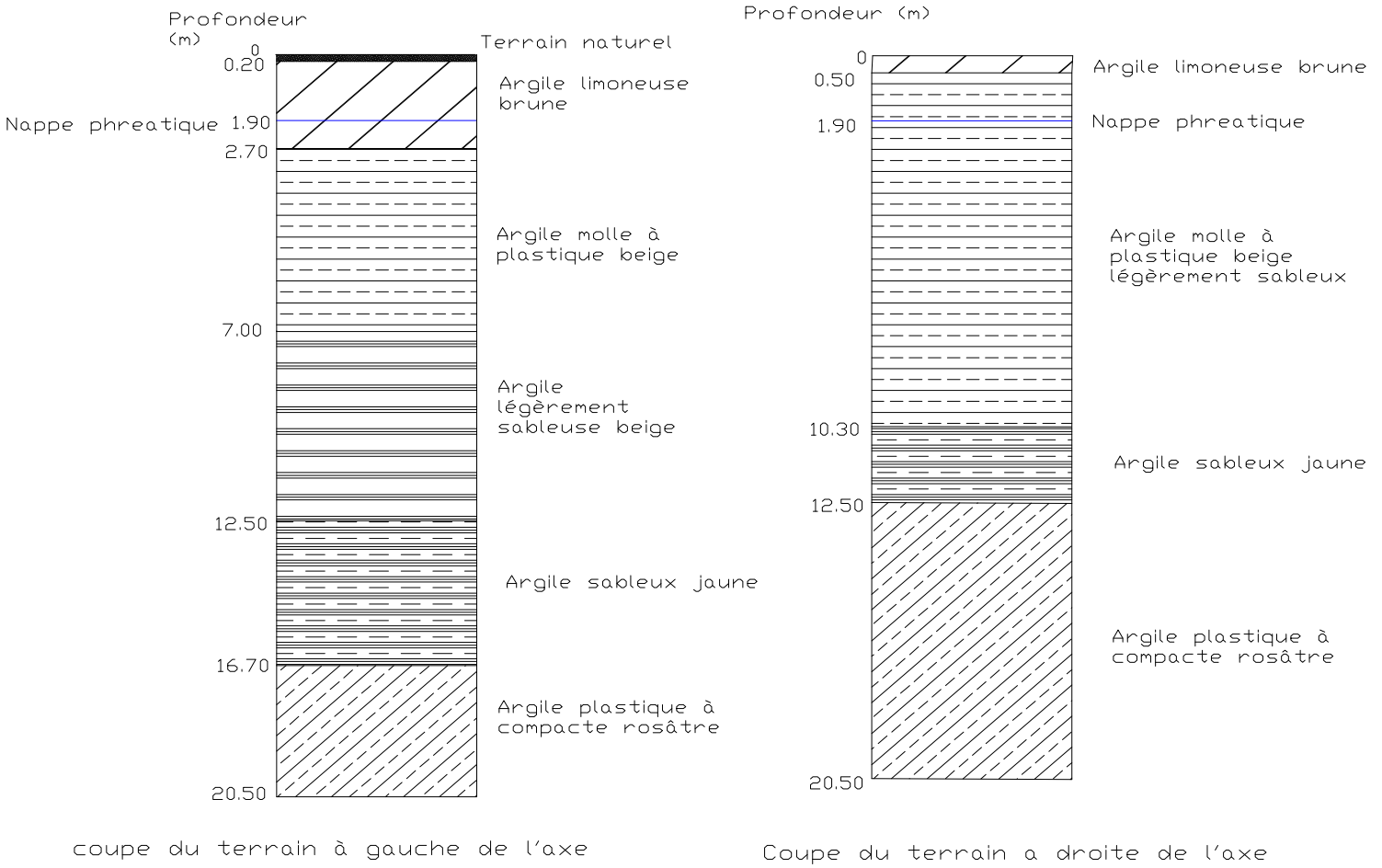


Figure 9: Coupe géotechnique du terrain dans la zone de terrassement

II.1.2. Matériau pour couche de remblai

Le contexte géologique fait que les ressources en matériaux meubles sont nombreuses dans la région. Le choix du matériau sera conditionné par sa performance mécanique, son emplacement et sa quantité.

Les essais géotechniques effectués ont permis de conclure que l'échantillon S_{14} dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3 :

Tableau 3: Caractéristique géotechnique du remblai

Numéro Echantillon	ω_{nat} en %	% F	ω_L	ω_p	IP	$\gamma_{d\ max}$ (KN/m^3)	ω_{opt} en %	Indice CBR à 4jours	% de Gonflement	CLASSIFICATION		
										HRB	LPC	GTR
S_{14}	-	39	37	23	14	19.6	13.8	18	0.19	A_6	LP	A_2

Le volume de l'échantillon, à 1,5 km de cette section (pk 77+000), est estimé à 5 m^3 suffisant pour le remblayage de cette portion de la route (MTPM, 2011).

L'exécution du remblayage se fera en 2 temps avec un degré de compactage égal à 95 % de l'OPM de façon à réduire le risque de tassement, à avoir une bonne portance et empêcher l'eau de s'infiltrer.

II.2. ETUDE SUR LA CHAUSSEE

II.2.1. Choix du type de chaussée

En tenant compte de la classe de trafic T2, selon la classification de la LCPC (MTPM, 2010), pris comme référence dans le cadre du projet de réhabilitation de la route, le choix d'une chaussée souple est approprié.

Notons qu'une chaussée est constituée par de nombreuses couches (Figure 10) qui se superposent les unes aux autres et assurent des rôles dans la rigidité et la perméabilité d'une route. La durée de vie d'une route est fonction de la résistance de la chaussée, d'où l'importance de bien choisir et d'effectuer des essais au laboratoire pour les différents matériaux qui la constituent.

Les différentes couches de la chaussée peuvent être constituées soit par des matériaux meubles, soit par des matériaux rocheux selon les besoins et les choix imposés par le milieu. Chaque type de matériau devra faire l'objet d'une série d'essais au laboratoire en vue de leur utilisation. Ces couches sont :

- couche de roulement (couche de surface);
- couche d'accrochage (couche de surface);
- couche de base (couche d'assise);
- couche de Fondation (couche d'assise);
- plate forme (terrain naturel).

Figure 10: Les différentes couches de la chaussée (Chaussée souple)

II.2.2. Les matériaux pour couche de la chaussée

Les matériaux pouvant être utilisés pour couche de la chaussée sont nombreux. Ils varient des matériaux meubles aux matériaux rocheux en passant par des matériaux combinant ces deux grandes catégories, à condition qu'ils satisfassent aux spécifications imposées.

II.2.2.1. Couche de fondation

On peut employer soit des matériaux meubles (matériaux sélectionnés) soit des matériaux rocheux. On peut avoir : les graveleux latéritiques naturels (améliorés ou non), les granulats concassés non traités (GCNT), les sables argileux (améliorés ou non), les scories volcaniques ou pouzzolanes, les matériaux coquilliers et coralliens naturels (CEBTP, 1972).

Dans notre étude, nous avons utilisé 2 types de matériaux : les matériaux sélectionnés et les graves concassés non traités (GCNT 0/60) (MTPM, 2010).

II.2.2.2. Couche de Base

Pour la couche de base nous pouvons utiliser les graveleux latéritiques naturels, les graveleux concassés non traités (GCNT), les sables argileux, les graves bitumes, les graves ciments et autres matériaux traités comme les sables, graves coquilliers ou coralliens mais à condition que leur performance mécanique soit suffisante et conforme à celle requises pour les graves et sables traitées (CEBTP, 1972). Le type de matériau choisi est le grave concassé non traité (GCNT 0/40) (MTPM, 2010).

Les Graves Concassés Non Traités (GCNT) sont obtenus à partir de bloc de roche en provenance de la carrière à Marohady (Figure 11). Les blocs abattus à la dynamite sont ensuite transportés par des camions jusqu'au concasseur (Figure 12) d'ouverture réglable selon la classe granulaire voulue (par exemple : Classe 0/60, 0/40, 10 /14, etc.). Ces blocs sont concassés selon la dimension souhaitée. Puis, les matériaux concassés (GCNT) sont chargés dans un camion et transportés sur le chantier où ils seront utilisés.

Figure 11: Site d'extraction des blocs de roche après abattage à la dynamite à la Carrière de Marohady

Figure 12: Concassage des blocs de roche en GCNT de dimension déterminé

II.2.2.3. Couche roulement

Comme couche de revêtement, on a les enduits superficiels, les micros enrobés (sand asphalt), les enrobés denses et les bétons bitumineux (CEBTP, 1972). Le type choisi est un mélange de cut-back 400/600 avec des granulats de la classe 10/14 pour la première couche et 6/10 pour le second (MTPM, 2011).

II.2.3. Caractéristiques et fonctions de chaque couche

II.2.3.1. La plate forme

La plate forme, par définition, est la partie des 30 cm supérieures des terrassements, et sur laquelle vont être mise en œuvre les différentes couches de la chaussée. Elle permet de déterminer les épaisseurs requises des différentes couches de la chaussée surtout la couche de fondation par évaluation de sa performance ou portance. En effet, associée à la classe de trafic (Tableau 4) la portance de la plate forme donne directement l'épaisseur requise pour les différentes couches de la chaussée ainsi que la qualité des matériaux à utiliser.

Ce tableau renseigne sur l'épaisseur de différentes couches en fonction de la portance de la plate forme (donnée ici par la valeur du C.B.R. à 4 jours d'imbibition dans l'eau) et la classe de trafic (T) :

Tableau 4: Epaisseur des assises de la chaussée en fonction de la portance de la plate forme et de la classe de trafic

Classe du trafic / CBR Plate forme	T1		T2		T3		T4	
	Fondation (en cm)	Base (en cm)	Fondation (en cm)	Base (en cm)	Fondation (en cm)	Base (en cm)	Fondation (en cm)	Base (en cm)
5 – 10	20	15	25	15	25	20	30	20
10 – 15	15	15	20	15	20	20	25	20
15 – 30	10	15	15	15	15	20	20	20
30 – 80	0	15	0	15	0	20	0	20
>80	0	0	0	0	0	0	0	0

Source: Liautaut, 1980

La plate forme joue un rôle prépondérant sur le comportement de la chaussée. Elle doit être suffisamment indéformable pour permettre le compactage des couches de la chaussée sur incombantes.

De ce fait, les matériaux utilisés comme support ou plateforme doivent répondre à des critères bien déterminés. Les sols ayant les caractéristiques géotechniques ci-après sont à prohiber :

- un C.B.R faible, donc de portance faible ;
- un I.P. > 40 ;
- un gonflement linéaire dans le moule C.B.R. > 2% (Liautaut, 1980).

Cependant en cas de problème de gisement, on pourra procéder à des traitements des matériaux. Par exemple, le traitement à la chaux vive diminue la teneur en eau naturelle et de l'I.P., ou le mélange avec du sable amaigrit et donne du squelette au matériau de la plate forme.

II.2.3.2. La couche de fondation

Elle est constituée de matériaux mises en œuvre sur la plate forme qui contribuent à réduire les contraintes transmises au sol sous-jacent et leur assurent une transmission de charge efficace pour minimiser les déformations qui pourraient subvenir face aux diverses sollicitations. Elle doit avoir des résistances et performances suffisantes pour pouvoir résister aux contraintes engendrées par le trafic.

Ses caractéristiques et épaisseurs dépendent de la portance de la plate forme et du type de trafic. Les matériaux utilisés sont, soit des matériaux sélectionnés pour les trafics faibles à moyens, soit des matériaux concassés (GCNT) pour les trafics importants.

On exige un minimum de CBR 30 pour un degré de compacité au moins égale a 95 % $\gamma_{d\ opt}$ et en outre un diamètre maximum de 60mm quelque soit le type de matériaux.

Cas des Matériaux sélectionnés :

Les matériaux sélectionnés doivent avoir les spécifications suivantes :

- un pourcentage de fine variant de 7 à 30% ;
- un I.P. < 12 ;
- un CBR > 30 *(Liautaut, 1980).*

On éliminera les matériaux friables et qui s'écrasent sous de très faible pression.

Les types de matériaux sélectionnés :

- les graveleux latéritiques provenant de l'altération ferralitique des roches sous climats tropicaux et qui conduisent à la formation de concrétion ferrugineuse dans les profils pédologiques. Les niveaux d'accumulation B de concrétion conviennent pour couche de chaussée si ils satisfont aux critères en supra et sont aussi conformes au fuseau ci après (Tableau 5).

Tableau 5: Fuseau typique pour les graveleux latéritiques pour matériaux sélectionnés

Granulométrie	Fuseau proposé % passant
40 mm	95 – 100
31.5 mm	90 – 100
20 mm	75 – 100
10 mm	58 – 100
5 mm	40 – 78
2 mm	28 – 65
1 mm	22 – 56
0.5 mm	18 – 50
80 µm	5 – 35

Source : Liautaut, 1980

En dehors de ce fuseau, le sol ne sera pas recommandé comme couche de fondation. En effet, une modification de la granulométrie changerait la portance de la couche par exemple une augmentation du pourcentage de fines diminuant la portance par appauvrissement en squelette granulaire. Par contre, une augmentation de pourcentage des éléments de dimension supérieure compliquerait la mise en œuvre et favorise la ségrégation entre les entités.

Des spécifications (Tableau 6) ont été établies selon le type de trafic :

Tableau 6: Spécification technique pour les graveleux latéritiques

Classe de trafic	T1 – T2	T3 – T4	T5
Maximum passant à 80 µm	35	30	30
I.P. maximum	30	20	20

Source: Liautaut, 1980

- les sables argileux qui proviennent, soit des dépôts sédimentaires soit de l'altération des formations in-situ, sont aussi d'usage courant pour la technique routière et doivent satisfaire les conditions suivantes :
  - pourcentage de fines (< 80 µm) variant de 10 à 30 % ;
  - I.P. de 5 à 20 ;
  - $\gamma_{d\ opt}$ allant de 1.90 à 2.10 KN/m^3 et un ω_{opt} de 7 à 13 % ;
  - un pourcentage de gonflement G_{max} à 2.5% (Liautaut, 1980).

Cas des Matériaux concassés :

Pour les couches de fondation en matériaux concassés, les granulats doivent avant tout avoir une résistance élevée pour pouvoir absorber les contraintes imposées par le trafic. Ils doivent par exemple avoir un L.A. inferieur à 50, un pourcentage de fines variant de 0 à 20%, un diamètre maximum de 60 mm aussi une forme bien volumineuse et les roches ayant tendance à se casser en plaquettes sont éliminées.

La spécification adoptée pour les travaux de réhabilitations est la suivante :

- Pourcentage de fines (< 80 µm) variant de 4 à 16% ;
- E.S. ≥ 40 ;

– C.A. < 25 (MTPM, 2010).

II.2.3.3. Couche de base

C'est une couche soumise à des sollicitations importantes, elle assure en grande partie la transmission des charges imposées par le trafic aux couches sous jacentes. Pour cela, elle doit avoir une résistance mécanique élevée, nécessitant l'emploi des matériaux rocheux comme couche de base.

En général, elle est constituée par des matériaux concassés (GCNT) de la classe 0/31[5] ou 0/40 et ayant les caractéristiques suivants : un pourcentage de fine variant de 4 à 16%, un équivalent de sable supérieur à 40 et une forme assez volumineux un CA inférieure ou égale à 25.

II.2.3.4. Couche de Roulement

Elle constitue la partie qui va supporter la circulation, c'est la partie la plus sollicitée de la chaussée. Elle doit assurer le confort et la sécurité de la circulation et surtout la protection de l'ensemble de la chaussée à l'action de l'eau. Les matériaux rocheux qui vont constituer la couche de roulement, doivent impérativement avoir un LA inférieur à 35.

Le tableau 7 résume l'épaisseur et les matériaux utilisés pour chaque couche de la chaussée

Tableau 7: Caractéristiques des matériaux constitutifs de chaque couche de la chaussée.

Zone Homogène (Pk en Km)	Plate forme	Couche de fondation	Couche de base	Couche de roulement
74+500 – 77+000	-	MS 35 cm	GCNT 0/40 27 cm	Bicouche
77+000 – 78+500	-	GCNT 0/60 25 cm	GCNT 0/40 20 cm	Bicouche
79+000 – 81+040	LS Jaunâtre CBR 18 à 25 + Macadam	GCNT 0/60 20 cm	GCNT 0/40 20 cm	Bicouche
81+040 – 82+000	LS Jaunâtre CBR 18 à 25	Quartzite en place (Remise en forme et compactage) 60 cm	GCNT 0/40 27 cm	Bicouche
82+000 – 88+000	LS Jaunâtre CBR 18 à 25 + Macadam	GCNT 0/60 20 cm	GCNT 0/40 20 cm	Bicouche

II.3. ETUDE DES MATERIAUX POUR LA REALISATION DES TRAVAUX

II.3.1. Les matériaux meubles

Après l'échantillonnage, on doit procéder à des essais de laboratoire afin de déterminer un certain nombre de paramètres pour la classification et la résistance mécanique.

Au cours des travaux de laboratoire, on procède aux essais suivants : essais d'identification du sol par la mesure d'un certain nombre de paramètres physiques et des essais mécaniques.

II.3.1.1. Essais d'identification

a) Teneur en eau

Elle permet de connaitre le pourcentage du poids d'eau libre présente dans un certain volume de sol par rapport au poids des éléments solides dans ce volume.

Elle donne une première approximation sur l'état hydrique du sol en place.

La prise d'essai humide est pesée puis séchée à l'étuve à 105 °C en laboratoire ou au réchaud à gaz sur le chantier jusqu'à masse constante. La teneur en eau du matériau est le rapport en pourcentage entre la masse d'eau et la masse de matériau sec (Guyot, 2004).
Nos échantillons montrent une teneur en eau naturelle variant de 17.5 à 5% (Tableau 8).

Nous remarquons que les échantillons graveleux possèdent une faible quantité d'eau et cette quantité tend à augmenter quand la dimension des grains diminue.

b) Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition pondérale des grains constitutifs d'un sol par classe de taille. Elle est réalisée par tamisage mécanique pour les grains supérieurs à 80µm.

Au moyen d'une série de tamis de contrôle d'ouvertures de mailles décroissantes, la prise de sol est fractionnée, après séchage et pesée en refus ou passants dont la masse est rapportée à la masse initiale du matériau (Guyot, 2004).

L'analyse granulométrique nous a permis d'établir le tableau 8 ci après qui nous renseigne sur la répartition en pourcentage des grains en fonction de leur dimension :

Tableau 8: Pourcentage des grains en fonction de leur dimension

Echantillons	GRAVIERS (en %)	SABLES (en %)	ELEMENTS FINS(en %)
S_1	0	95	5
S_2	25	61	14
S_3	17	71.5	11.5
S_4	8	74.5	17.5
S_5	49	48.5	2.5
S_6	37	57.6	5.4
S_7	17	37	46
S_8	22	59	19
S_9	12	59	29
S_{10}	20	65	15
S_{11}	17	48	35
S_{12}	15	34	51
S_{13}	19	22	59
S_{14}	13	58	39

Les courbes granulométriques ainsi obtenues (Figures 13 et 14) permettent d'identifier les sols étudiés offrant ainsi une connaissance sur l'état du sol et la répartition de chaque grain dans l'ensemble même de l'échantillon et surtout de déterminer le pourcentage des fines. On entend par fine les éléments dont le diamètre est inférieur à 80µm.

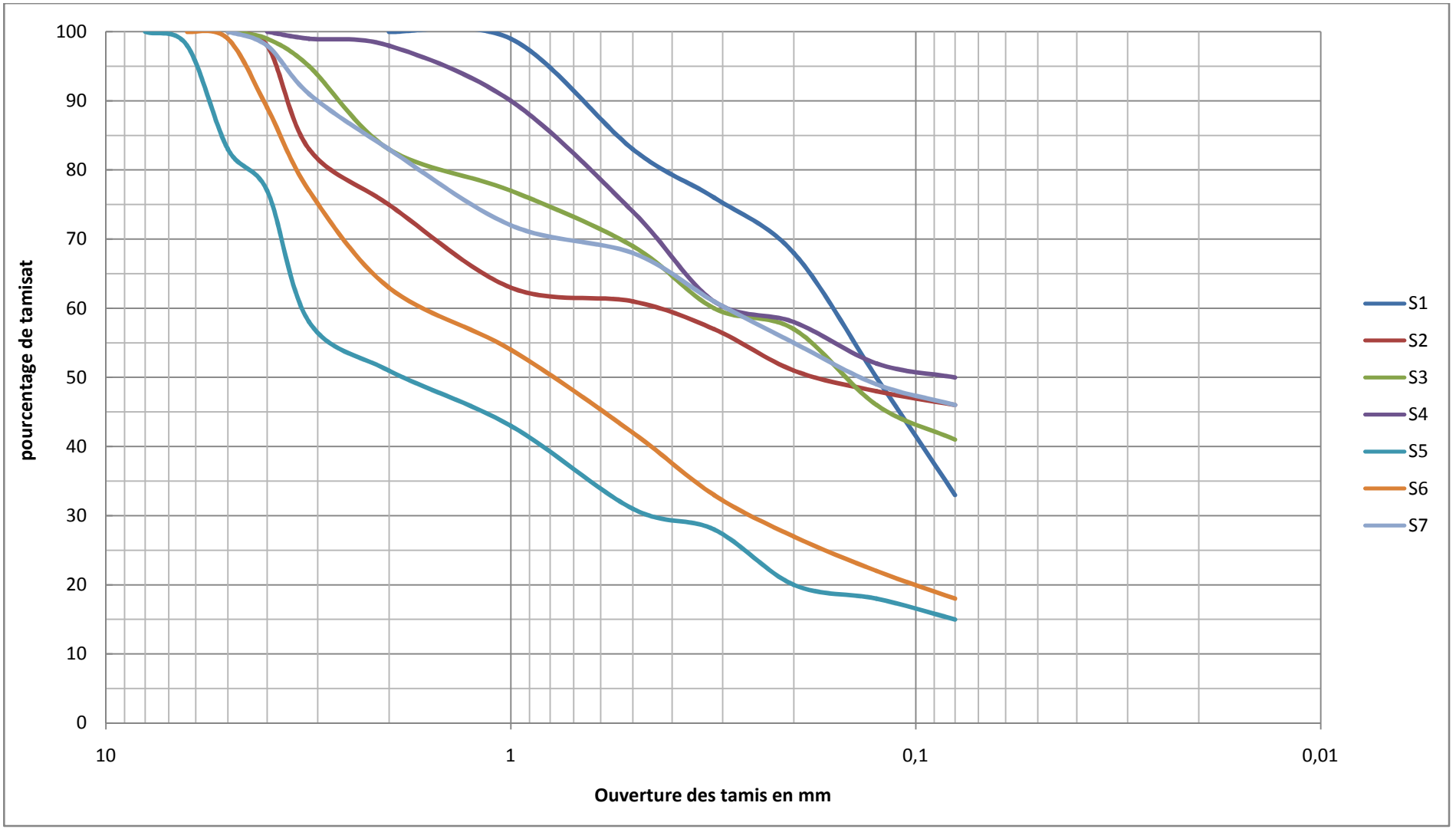


Figure 13: Courbe granulométrique des matériaux meubles (S_1 à S_7)

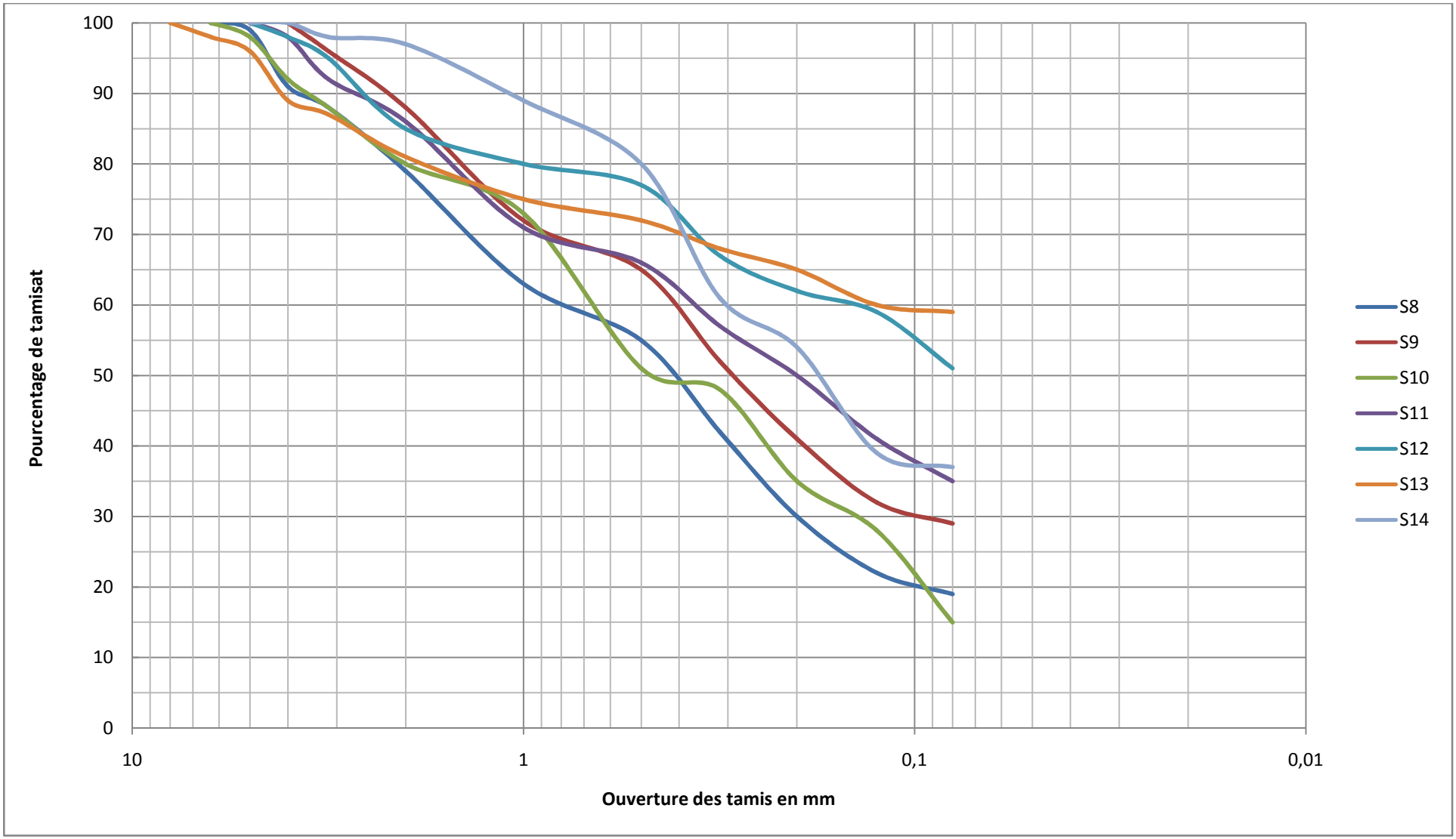


Figure 14: Courbe granulométrique des matériaux meubles (S_8 à S_{14})

D'après les courbes granulométriques (Figures 13 et 14), l'ensemble des échantillons présente un diamètre maximum de 2 à 8 mm et un pourcentage de fine allant de 18 à 59 %. Cette dernière est le plus souvent le critère de choix qui guide vers l'emploi ou non des matériaux dans la construction routière.

En fonction des allures des différentes courbes granulométriques obtenus pour chaque échantillon, on peut conclure que :

- les courbes S_1 et S_8 sont des limons argileux ;
- les échantillons S_2, S_6, S_{11} et S_{13} ont une granulométrie étalée et continue (arène granitique) ;
- les échantillons S_3, S_4, S_5, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{12} et S_{14} ont une granulométrie étalée et discontinue (alluvion de sable et gravier).

Toutes les dimensions sont représentées dans l'ensemble des échantillons mais mal réparties pour la plupart. Les courbes dans la Figure 15 ont été prises pour référence pour l'établissement des classifications ci-dessus.

Analyse granulométrique

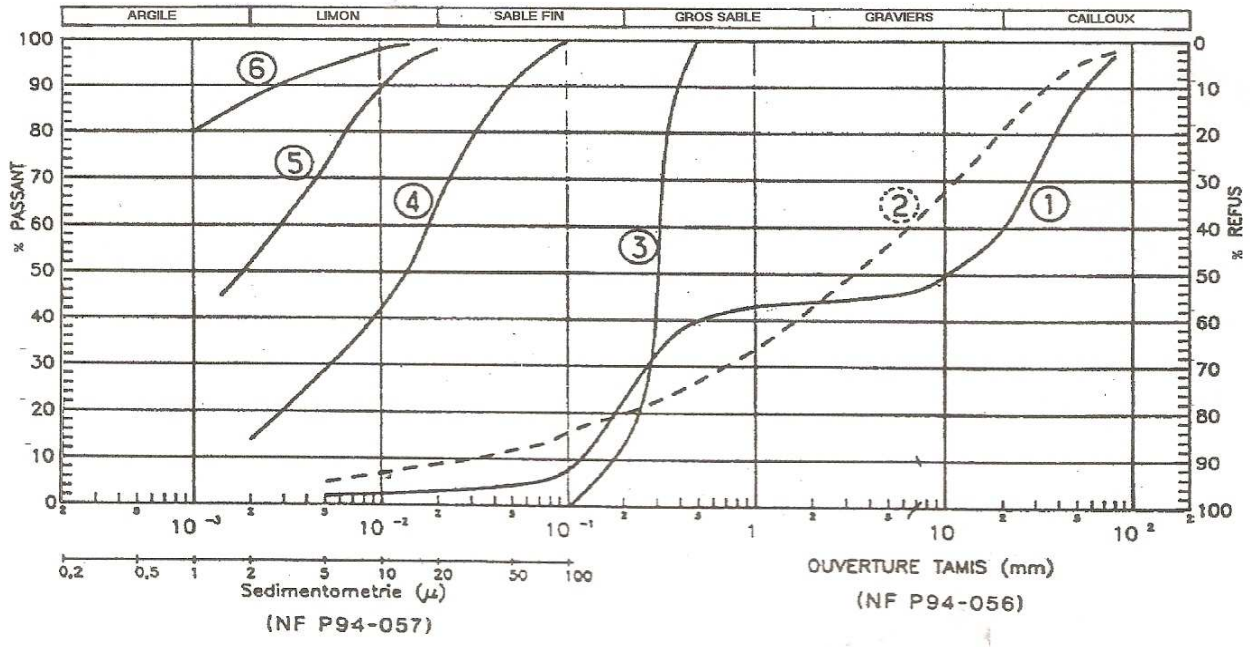


Figure 15: Courbe de référence pour l'analyse granulométrique

(1): Granulométrie étalée et discontinue (alluvions de sables et graviers)

(2): Granulométrie étalée et continue (arène granitique)

(3): Granulométrie serrée

(4): Limon argileux

(5): Argile limoneuse

(6): Argile pratiquement pure (type bentonite)

c) Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eaux pondérales correspondantes à des états particuliers d'un sol. Ce sont des paramètres géotechniques qui marquent les seuils entre les états de consistance suivants des sols. On peut distingués :

- la limite de liquidité : c'est la détermination de la teneur en eau du sol marquant le passage de l'eau de l'état plastique à l'état liquide. On recherche la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol remanié placé dans une coupelle doit se refermer sur à peu près un centimètre sous l'effet d'environ 25 chocs répétés (Guyot, 2004).
- la limite de plasticité : il s'agit de la détermination la teneur en eau du sol marquant le passage de l'état plastique à l'état solide. On recherche la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.

Ces limites sont mesurées par la fraction de sol qui passe au tamis de 0.40 mm. A partir de la teneur en eau dans le sol on a définit 3 états (Figure 16) qui sont : l'état liquide, plastique et solide (Guyot, 2004).

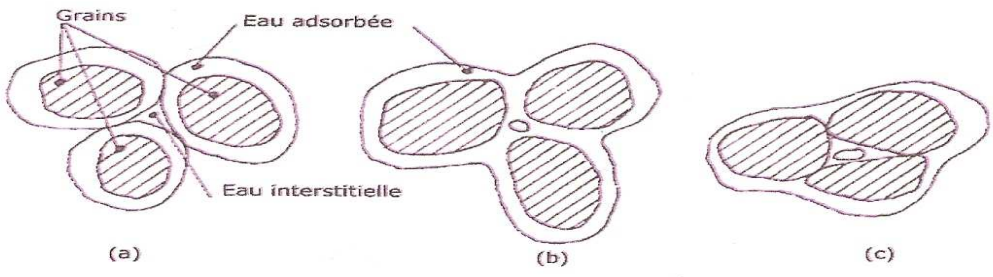


Figure 16: Les divers états d'un sol ; (a) : état liquide, (b) : état plastique, (c) : état solide

Les limites d`Atterberg visent à déterminer le comportement des échantillons à différentes teneurs en eau ; ce qui nous aiderons dans le choix des matériaux à utiliser. On écartera les sols plastiques (argileux) qui sont sensibles à l'eau et sont favorables au gonflement et au retrait détruisant les couches supérieures de la chaussée.

Nos échantillons ont un indice de plasticité (IP) inférieur à 20 et une limite de liquidité de 28 à 51 %. Ces valeurs sont liées étroitement à la granulométrie qui montre la répartition des grains selon leurs diamètres. On remarquera que les échantillons les plus sensibles à l'eau (IP élevé) sont ceux dont le pourcentage de fine sont les plus importants. Notons que la quantité d'eau nécessaire pour saturer un volume v de particules fines est plus importante que la quantité d'eau pour saturer un même volume v de grosses particules.

L'indice de plasticité nous renseigne sur l'état de plasticité du sol. Plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessiccation). On le calcul par : IP = ω_L - ω_P avec ω_L : limite de liquidité et ω_p : limite de plasticité

Tableau 9: Classification des sols en fonction de la granulométrie et des limites d'Atterberg (Classification HRB, LPC et GTR).

Numéro Echantillon	ω_{nat} en %	% F	ω_L	ω_p	IP	CLASSIFICATION		
						HRB	LPC	GTR
S_1	5	33	28	18	10	A_{2-4}	SA	B_5/B_6
S_2	14	46	41	27	14	A_{7-5}	SL	A_2
S_3	11.5	41	37	24	13	A_6	SA	A_2
S_4	17.5	50	48	33	15	A_{7-5}	SA	A_2
S_5	2.5	15	37	24	13	A_{2-5}	GA	C_L
S_6	5.4	18	36	23	13	A_{2-5}	GA	C_L
S_7	15.8	46	39	24	15	A_6	SA	A_6
S_8	9.8	19	47	35	12	A_{2-7}	GA	C_1
S_9	14.0	29	28	17	11	A_{2-6}	SA	B_6
S_{10}	5.7	15	37	24	13	A_{2-6}	GA	C_1
S_{11}	8.3	35	28	17	11	A_{2-6}	SL	A_2
S_{12}	14	51	49	32	17	A_{7-6}	LP	A_2
S_{13}	16.1	59	51	33	18	A_{7-5}	LP	A_2
S_{14}	-	39	37	23	14	A_6	LP	A_2

Les résultats (Tableau 9) montrent que les échantillons ont un indice de plasticité inférieur à 20 avec un maximum de 18 pour S_{14} et un minimum de 10 pour S_1

A partir de ces 3 essais, nous avons établi des classifications et une dénomination selon chaque type de classification. L'objectif de cette classification est de regrouper les échantillons qui ont les mêmes caractéristiques, donc de comportement mécanique plus ou moins similaires. Elles nous orientent aussi vers la probabilité d'utilisation des échantillons dans le domaine de la construction routière. Les détails de chaque type de classification sont donnés en annexe.

Le tableau 9 donne les noms des échantillons selon les différentes classifications employées.

D'après le tableau 9 nous pouvons distinguer 2 grandes catégories de sol :

- les sols comportant des gros éléments et des fines dont la plasticité est moyennes due à une faible proportion en fine. On englobe les échantillons S_1, S_5, S_6, S_8, S_9, S_{10} dans cette catégorie;
- les sols argileux et à forte proportion en fines. Les échantillons S_2, S_3, S_4, S_7, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14} sont dans cette seconde classe.

La granulométrie des sols présents dans la zone joue un rôle dans la perméabilité donc de l'action de l'eau sur les couches de la chaussée et de ces environs. En effet, la présence de gros grains en proportion élevé, mélangés à des particules fines, dans un sol entraine l'existence d'une discontinuité qui est représenté par des vides qui sépare les éléments du sol (porosité d'interstice). L'eau en provenance de la surface peut donc pénétrer dans ces vides ; y circuler sous l'effet de la gravité et dans certains cas s'y accumuler ce qui modifierait considérablement les propriétés mécaniques du sol.

Tableau 10: Dénomination selon chaque classification (HRB, GTR, LPC et Casagrande)

Numéros des échantillons	**Dénomination selon la classification HRB**	**Dénomination selon la classification LPC**	**Dénomination selon la classification GTR**	**Dénomination selon la classification De Casagrande**
S_1	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Sables Argileux	Sols sableux et graveleux avec des fines	Argile minérale de faible plasticité
S_2	Sols Argileux	Sables Argileux	Sables fins argileux, Limon, argile	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limons organiques
S_3	Sols Argileux	Sables Argileux	Sables fins argileux, Limon, argile	Argile minérale de moyenne plasticité à Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organique
S_4	Sols Argileux	Sables Argileux	Sables fins argileux, Limon, argile	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limons organiques
S_5	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Graves Argileux	Sols comportant des fines et des gros éléments	Argile minérale de moyenne plasticité à Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organiques
S_6	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Graves Argileux	Sols comportant des fines et des gros éléments	Argile minérale de moyenne plasticité à Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organiques
S_7	Sols Argileux	Sables Argileux	Sols fins	Argile minérale de moyenne plasticité à Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organiques

Numéros des échantillons	Dénomination selon la classification HRB	Dénomination selon la classification LPC	Dénomination selon la classification GTR	Dénomination selon la classification De Casagrande
S_8	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Graves Argileux	Sols comportant des fines et des gros éléments	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organiques
S_9	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Sables Argileux	Sols sableux et graveleux avec des fines	Argile minérale de faible plasticité
S_{10}	Mélange de Graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux	Graves Argileux	Sols comportant des fines et des gros éléments	Argile minérale de moyenne plasticité à Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organiques
S_{11}	Sols Argileux	Sable Limoneux	Sables fins argileux, Limon, argile	Argile minérale de faible plasticité
S_{12}	Sols Argileux	Limon Plastique	Sables fins argileux, Limon, argile	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organique
S_{13}	Sols Argileux	Limon Plastique	Sables fins argileux, Limon, argile	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limon organique à Limons
S_{14}	Sols Argileux	Limon Plastique	Sables fins argileux, Limon, argile	Limons minéraux de moyenne compressibilité et limons organiques

En se référant à l'abaque de plasticité de Casagrande (Figure 17), on peut conclure qu'on a à faire à un limon et argile de faible plasticité. Les échantillons ont une cohésion consistante vers la limite de plasticité allant de nulle à moyenne, une expansion réaction au secouage nulle à lente, sauf pour les échantillons sableux où la réaction est rapide ou lente selon la proportion de sable (BCEOM et CEBTP, 1992).

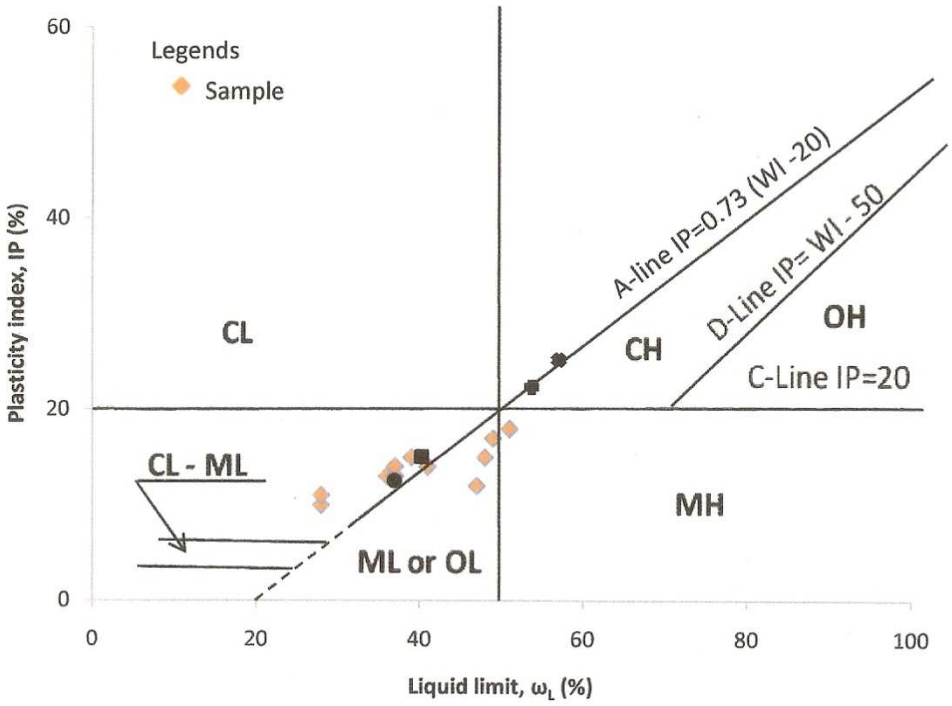


Figure 17: Abaque de plasticité de Casagrande

L'indice de plasticité (IP) requise dans la spécification pour une couche de fondation en matériaux sélectionnés est de moins de 12. Au dessus de cette valeur, on doit avoir recourt à un traitement pour amaigrir l'échantillon.

La relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité nous permet aussi d'établir une courbe avec laquelle on peut déterminer le type d'argile contenu dans l'échantillon.

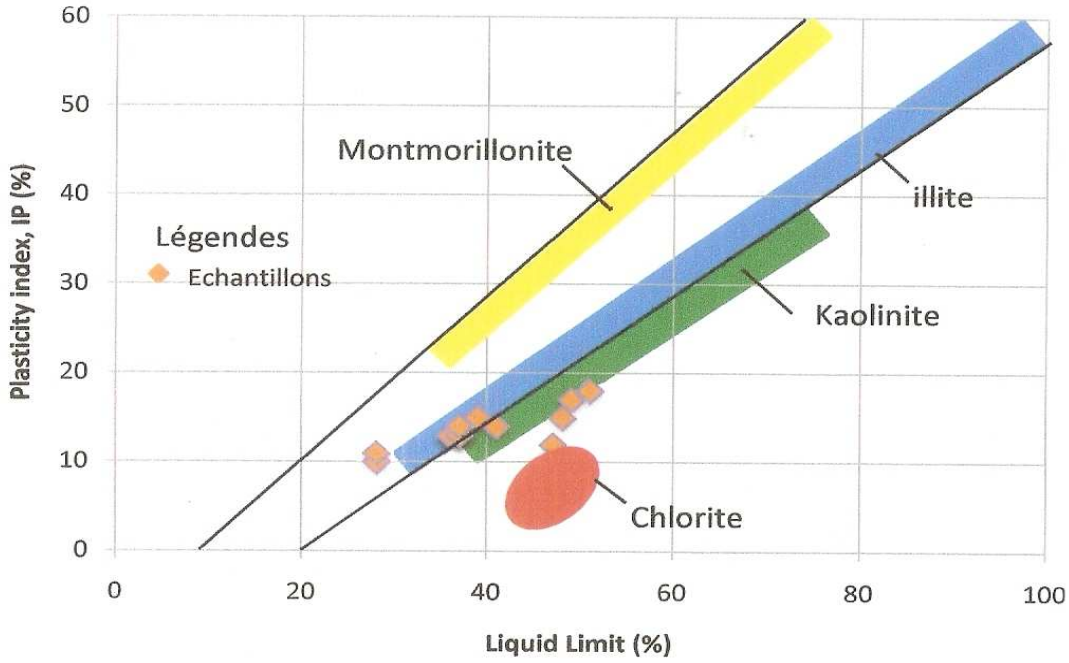


Figure 18: Type d'argile en fonction de l'indice de plasticité et de la limite de liquidité

La Figure 18 (Ohlmacher, 2000) montre que l'argile contenue dans le sol est du type kaolinite et illite, caractéristique des sols ferralitiques très répandus dans la grande île. Mécaniquement, ils sont insensibles aux problèmes de gonflement. Ce sont des sols très profonds caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires. Ils ont une forte teneur en sesquioxyde de fer et d'aluminium. Les minéraux argileux sont constitués par de la kaolinite et de la gibbsite ; l'illite, lorsqu'elle est présente ne l'est qu'à titre temporaire et ne s'observe que dans les sols jeunes. Le rapport SiO_2 / Al_2O_3 est inférieur ou au plus égal à 2 (Bourgeat, 1972). Ces minéraux proviennent de l'altération des feldspaths constituant la plupart des roches telles que les gneiss, les granites et les migmatites. Notons que la zone d'étude en question se trouve sur le complexe migmatitique de Mangoro. Les feldspaths se transforment par hydrolyse sous climat tempéré ou tropical en minéraux argileux par le phénomène de kaolinitisation. Dans un premier temps, ils deviennent opaques, blanchâtres, de plus en plus fragiles puis se transforment peu à peu en pâte argileuse. Tous les degrés d'altération peuvent être rencontrés selon l'intensité du processus subie par la roche. La formation de tel ou tel minéral argileux est conditionnée par le pH du milieu ; si celui-ci est acide, il se forme de la kaolinite ; s'il est basique, il se forme de l'illite (Ramasiarinoro, 2008).

II.3.1.2. Essais Mécaniques

a) Essais Proctor

L'essai Proctor vise à déterminer la valeur de la densité γ_{dopt} et la teneur en eau optimum notée ω_{opt}. Pour avoir ces valeurs, on doit compacter l'échantillon couche par couche dans un moule normalisé à l'aide d'une dame normalisée tout en faisant varier la teneur en eau jusqu'à avoir une courbe en cloche (poids volumique spécifique en fonction de la teneur en eau).

Dans la construction routière, l'essai Proctor modifié a été adopté parce qu'on a besoin de beaucoup plus d'énergie et un γ_{dopt} important pour pouvoir faire face au trafic répété des véhicules. D'après le tableau 11, le γ_{dopt} des échantillons varie de 17.4 à 29.5 kN/m^3 à des teneurs en eau avoisinant à la teneur en eau naturelle. Ces valeurs sont nécessairement utilisées pour vérifier la compacité obtenue in situ et à respecter la norme de compactage requise qui est au moins égale à 95 % de l'optimum Proctor. En pays tropical humide, la teneur en eau naturelle est généralement supérieure à la teneur en eau optimale (BCEOM et CEBTP, 1992).

b) Essais CBR

L'essai consiste à déterminer l'indice portante CBR à 4 jours d'immersion (par poinçonnement) ainsi que le gonflement en pourcentage de l'échantillon dans les conditions les plus défavorables.

Les résultats du tableau 11 nous montrent les valeurs du pourcentage de gonflement et de l'indice CBR à 4 jours d'immersion. Les spécifications imposent que pour être utilisés en matériaux sélectionnés dans la construction routière, l'indice CBR à 4 jours d'immersion doit être supérieur à 30 et le pourcentage de gonflement inférieur à 2 %.

Nous constatons déjà que le pourcentage de gonflement pour tous les échantillons est largement inférieur à 2%. Par contre, l'indice CBR supérieur à 30 n'est pas respecté pour l'ensemble des échantillons; seuls les échantillons S1, S3, S5, S6, S8, S10 répondent à la spécification. Les autres échantillons, par contre, doivent être traités pour leur éventuelle utilisation.

Tableau 11: Tableau récapitulatif des résultats obtenus aux laboratoires

Numéro Echantillon	ω_{nat} en %	% F	ω_L	ω_p	IP	$\gamma_{d\ max}$ (KN/m^3)	ω_{opt} en %	Indice CBR à 4jours	% de Gonflement	CLASSIFICATION		
										HRB	LPC	GTR
S_1	5	33	28	18	10	20.40	9.2	31	0.14	A_{2-4}	SA	B_5/B_6
S_2	14	46	41	27	14	29.40	12	28	0.14	A_{7-5}	SL	A_2
S_3	11.5	41	37	24	13	29.5	12.2	34	0.04	A_6	SA	A_2
S_4	17.5	50	48	33	15	28.5	15.9	21	0.34	A_{7-5}	SA	A_2
S_5	2.5	15	37	24	13	21.2	6.1	35	0.01	A_{2-5}	GA	C_L
S_6	5.4	18	36	23	13	21.2	7.1	37	0.03	A_{2-5}	GA	C_L
S_7	15.8	46	39	24	15	17.4	16.6	13	0.59	A_6	SA	A_6
S_8	9.8	19	47	35	12	20.80	9.5	38	0.14	A_{2-7}	GA	C_1
S_9	14.0	29	28	17	11	19.50	12.2	18	0.23	A_{2-6}	SA	B_6
S_{10}	5.7	15	37	24	13	21.20	6.1	35	0.1	A_{2-6}	GA	C_1
S_{11}	8.3	35	28	17	11	19.70	10.1	25	0.71	A_6	SL	A_2
S_{12}	14	51	49	32	17	18.00	16.6	19	0.84	A_{7-6}	LP	A_2
S_{13}	16.1	59	51	33	18	17.5	18.4	23	0.20	A_{7-5}	LP	A_2
S_{14}	-	39	37	23	14	19.6	13.8	18	0.19	A_6	LP	A_2

II. 3.1.3. Proposition de matériau d´emprunt

L'échantillon S_{14} peut être proposé comme matériau pour la couche de fondation du Pk 74+500 au Pk 77+000 à cause de sa position géographique à proximité du tracé de la route en question. Cependant, ses caractéristiques géotechniques (tableau 9) ne respectent pas les spécifications imposées d'où la nécessité d´un traitement particulier.

Il convient de noter que les spécifications imposées pour les matériaux utilisés comme couche de fondation sont les suivantes :

- un pourcentage de fine variant de 7 à 30 % ;
- un IP < 12 ;
- un CBR (à jours d'immersion) ≥ 30 (MTPM, 2011).

La solution proposée consiste à procéder au mélange de l'échantillon avec du sable blanc dont le pourcentage de fines est de 9%. L'objectif étant de diminuer l'indice de plasticité et le pourcentage de fines tout en augmentant l'indice CBR pour obtenir les spécifications imposées.

a) Procédure du mélange

Le problème serait de déterminer le pourcentage idéal entre l'échantillon S_{14} et le sable blanc prélevés dans les environs. Le mélange ainsi obtenu doit satisfaire les spécifications et doit aussi faciliter la mise en œuvre lors des travaux.

Pour avoir ce résultat, on a donc recours à une série de mélanges en faisant varier à chaque fois la proportion de chaque échantillon (tableau 12).

Dans un premier temps, on a mélangé 80% de S_{14} avec 20% de sable blanc et le mélange ainsi obtenu est noté M1. Nous avons obtenu une amélioration de la capacité portante de l'échantillon comparée à S_{14}, accompagné d'un amaigrissement et un appauvrissement en fines de l'échantillon de départ, mais non conforme à la spécification (tableau 12).

Dans le mélange suivant noté M2, la proportion de 60% de S_{14} à 40% de sable blanc été adopté. Les résultats (tableau 12) montrent que l'indice portant CBR est légèrement

supérieur à la valeur 30 imposée, de même l'indice de plasticité est légèrement inférieur à 12. Le pourcentage de fines est juste à la limite, soit 30%. Avec des résultats limites comme ceux obtenus, dans ce cas, nous avons procédé à un dernier mélange dans le but d´avoir une amélioration notable sur les différents paramètres recherchés.

Le dernier mélange noté M3 est composé de 40% de S_{14} et de 60% de sable blanc. On note une augmentation conséquente de l'indice CBR ainsi qu'une diminution de l'indice de plasticité et du pourcentage de fines. Les résultats obtenus sont satisfaisants : un indice CBR de 44, un indice de plasticité égal à 9 et un pourcentage de fine de 25% (tableau 12). Cependant l'échantillon contient beaucoup de sable qui pourrait entrainer des difficultés dans la mise en œuvre au cours des travaux.

Les courbes obtenues lors de l'analyse granulométrique faite sur ces 3 échantillons (Figure 19), nous montre bien l'évolution de la proportion des éléments constitutifs de l'échantillon :

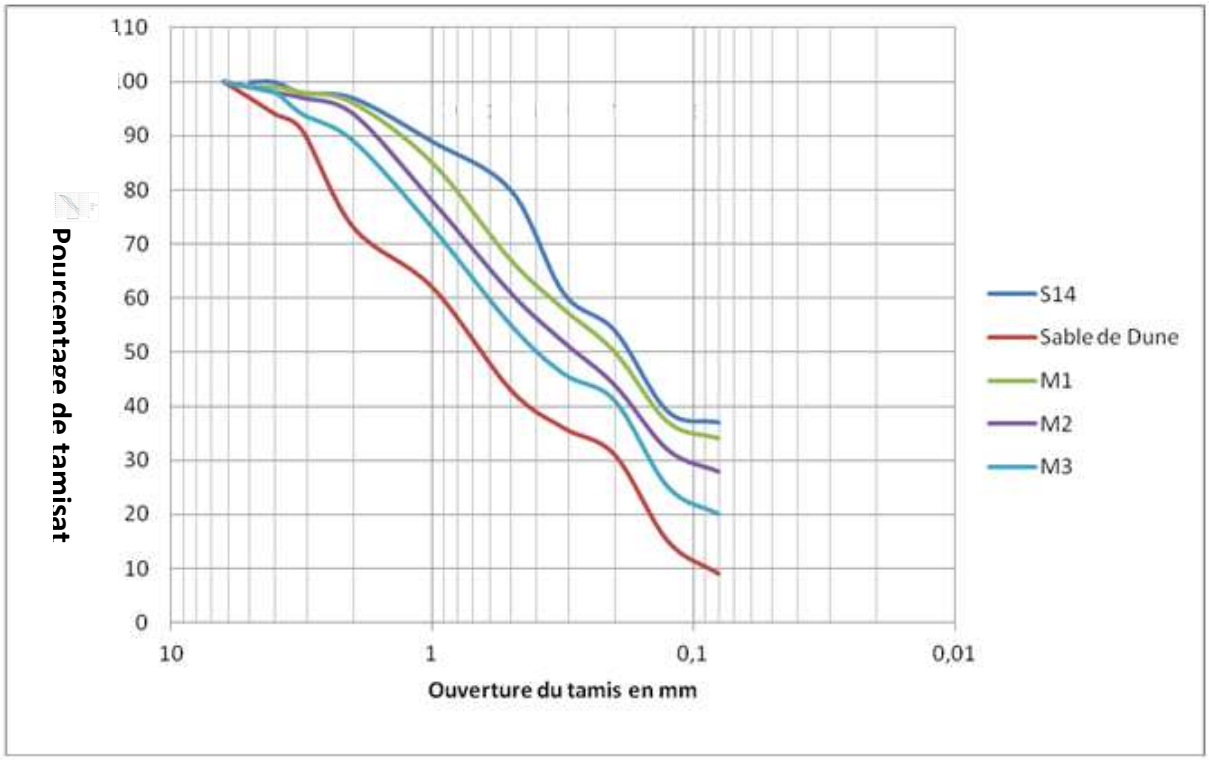


Figure 19: Courbe granulométrique des mélanges

Tableau 12: Résultats des essais pour les 3 mélanges différents selon la proportion en S_{14} et en sable blanc

Numéro échantillons	Identification				Proctor modifié		Portance		Classification		
	Φmax (mm)	% F	ωl	IP	$\gamma_{d\ opt}$ (kN/m^3)	ω_{opt} (%)	CBR4j	%G	HRB	LPC	GTR
S_{14}	5	39	37	14	19.60	13.8	18	0.19	A_6	LP	A_2
Sable blanc	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M1 Mélange de 80% de LAS et 20% de sable blanc	5	32	20	12	20.04	9.6	28	0.11	A_6	LP	A_2
M2 Mélange de 60% de LAS et 40% de sable blanc	5	30	19	11	21.24	9.4	33	0.11	A_6	LP	A_2
M3 Mélange de 40% de LAS et 60% de sable blanc	5	25	18	9	22.10	9.0	44	0.08	A_6	LP	A_2

b) Détermination de la proportion de chaque échantillon à utiliser comme couche de fondation

La solution la plus appropriée est celle qui satisfait en même temps la spécification imposée et qui facilite la mise en œuvre de l'échantillon lors des travaux, c'est à dire avec des proportions tolérables de sable blanc. Pour avoir la proportion idéale, nous avons établi une courbe (Figure 20) montrant l'indice CBR en fonction de la proportion de S_{14} et de sable blanc (en %), dans laquelle on notera la proportion en élément ayant un indice CBR nettement supérieur à 30 :

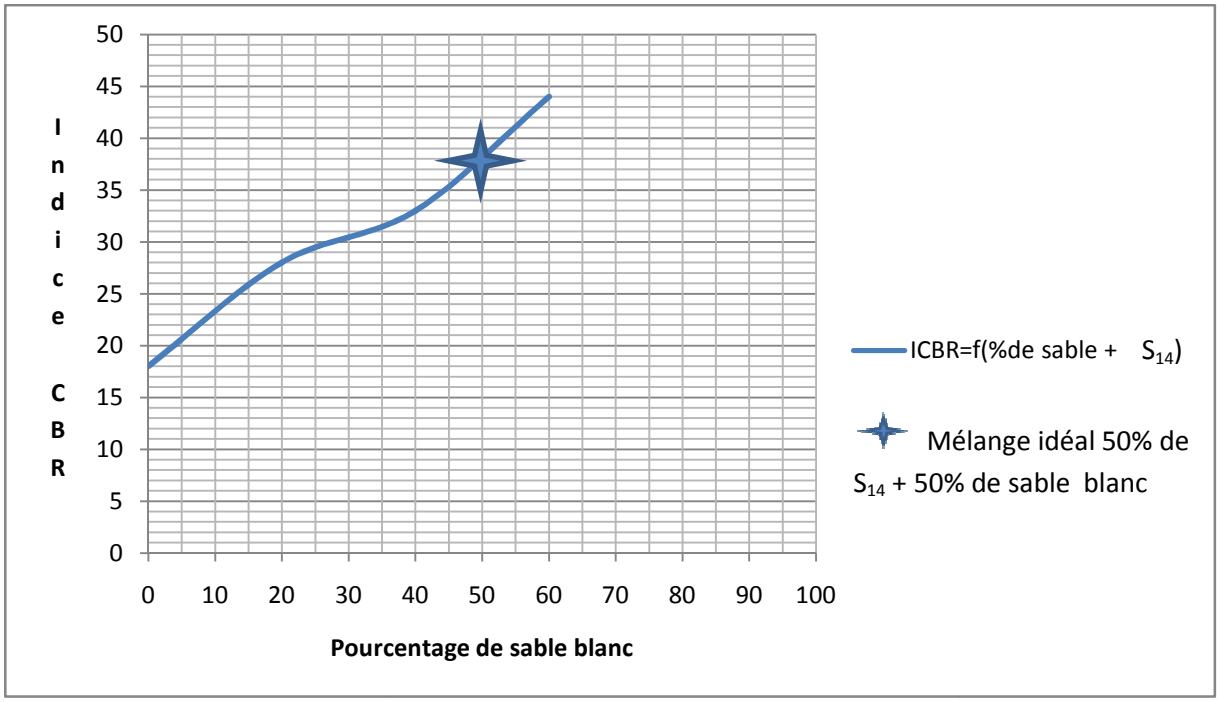


Figure 20: Courbe du mélange S_{14} et Sable blanc ICBR = f (%S_{14} + % Sable blanc)

Après avoir établi la courbe ci-dessus (Figure 20), nous avons constaté qu'avec 50% de S_{14} et 50% de sable blanc, on a obtenu un indice CBR largement supérieur à 30 imposé par la spécification. Mais pour en être sûr, nous avons procédé à des essais de laboratoire afin de vérifier les différents paramètres géotechniques du mélange. Les résultats ainsi obtenus sont consignés dans le tableau 13.

Tableau 13: Résultats obtenus lors des essais au laboratoire pour le mélange idéal

Numéro Echantillon	Identification				Proctor modifié		Portance		Classification		
	Φmax (mm)	% Fines	ω_L	IP	γ_{dopt} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)	CBR4j	%G	HRB	LPC	GTR
M Mélange de 50% de S_{14} et 50% de sable blanc	6.3	30	27	10	22.12	8.7	35	0.11	A_6	LP	A_2
Spécification	**-**	**7 à 30**	**-**	**<12**	**-**	**-**	**>30**	**-**	**-**	**-**	**-**

Les résultats (tableau 13) montrent que l'échantillon M est conforme à la spécification avec ces 30% de fines, un indice de plasticité égal à 10 et son indice CBR de 35. Le mélange nouvellement formé sera donc utilisé comme couche de fondation dans la zone prévue.

Dans la proportion 60% de S_{14} et 40% de sable blanc, on a une valeur de l'indice CBR largement supérieure à la proportion 50% de S_{14} et 50% de sable blanc. Par contre, le pourcentage de sable dans le mélange est élevé pouvant posés des problèmes dans la mise en œuvre sur le chantier ; ainsi la proportion de 50% de S_{14} et 50% de sable blanc a été utilisée.

II.3.2. Les matériaux rocheux

II.3.2.1. Caractéristiques pétrographiques des roches

Notre carrière se trouve au pk 68 + 200 à Marohady, qui est environ à 2 km du côté droite de l'axe de la RN 44. Elle se trouve sur un flanc de taille de 15 à 20 m de hauteur. On y rencontre 2 formations bien distinctes marqués par des multitudes de fractures de direction générale Nord-Sud et de pendage sub-vertical à redressé (70° à 80°w). Le tableau 14 nous montre une petite description pétrographique des échantillons.

Tableau 14: Description pétrographique des échantillons rocheux

Numéro de l'échantillon	Nature visuelle	Couleur	Texture	Taille des grains	Composition minéralogique
R_1	Granite Migmatitique	Mésocrate	orientée	Moyen	Quartz Feldspath Biotite Amphibole
R_2	Granite à biotite	Mésocrate	Massive	fin	Quartz Feldspath Biotite (abondant)

II.3.2.2. Essai Mécanique

Dans le domaine de la géotechnique, les échantillons doivent faire l'objet d'essais au laboratoire en vue de déterminer leur performance mécanique et de spécifier par la suite leur utilisation. Ces essais concernent : l'essai de résistance aux chocs des granulats, l'essai Los Angeles (LA) et l'essai Microdeval (MDE) ou de résistance au frottement des granulats entre eux, le Coefficient d'Aplatissement (CA), l'Equivalent de sable (ES).

On tient plus d´importance sur la performance mécanique de la roche que sur sa composition minéralogique. Les granulats proviennent des roches concassées. On prend un bloc de chaque formation pour avoir des granulats de la classe 10/14 avec lesquels les essais seront effectués.

II.3.2.3. Essai Los Angeles (LA)

Il consiste à déterminer la résistance au choc des granulats et à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètre compris entre 4 et 50mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles. Les résultats sont consignés dans le *tableau 15***.**

Les résultats obtenus seront comparés à la spécification pour chaque type d'assise (couche de fondation ou couche de base). Pour une couche de fondation, on exigera un LA inférieur à 50 tandis que pour une couche de base LA devra être inférieur ou égal à 35.

Selon ces spécifications**,** les 2 échantillons étudiés feront de très bonne couche de fondation. Cependant, seul l'échantillon R_2 est approprié pour une couche de base.

II.3.2.4. Essai Micro Deval

Il a pour but de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon par frottement. Pour cela, on soumet l'échantillon au frottement par l'intermédiaire d'un couvercle mis en rotation à 1200 tours contenant des billes de poids fonction de la classe granulaire et 2.5l d'eau. Les résultats obtenus consignés dans le *tableau 15.*

Les spécifications requises pour la couche de fondation est un MDE inférieur à 30 tandis que pour une couche de base elle sera inférieure ou égale à 30. Seul l'échantillon R_2 est approprié pour les assises de la chaussée (MTPM, 2011).

Cependant, dans la plupart des ouvrages récents, pour la couche de fondation on tient compte surtout de la valeur du coefficient LA par rapport à celle de MDE. Ainsi l'échantillon R_1 peut être utilisé comme couche de fondation.

Tableau 15: Résultats des essais mécaniques et leur probable utilisation dans les travaux routiers.

Numéro échantillon	Nature visuelle	LA	MDE	Utilisation
R_1	Granite migmatitique	40	32	Couche de Fondation **(Spécification : LA < 50 et MDE<30)**
R_2	Granite à biotite	35	23	Couche de fondation et/ou Couche de Base **(Spécification : LA≤35 et MDE≤30)**

Les résultats montrent que la mise en place d'un tri des échantillons serait appropriée pour éviter que les blocs de même nature que R_1 soient mélangés à l'échantillon R_2 dans la couche de base.

Compte tenu du résultat limite (LA=35) obtenu sur l'échantillon R_2 prévu comme couche de base, la classe de départ 0/31[5]à été remplacée par la classe 0/40 pour gagner en résistance. Les performances mécaniques des roches pour couche de base sont à la limite

des spécifications (*Tableau 15)*. Pour augmenter la résistance de la couche nous avons seulement augmenté la dimension des granulats. L'objectif étant d'avoir beaucoup plus de squelettes granulaires pour supporter les charges imposées par le trafic.

Que ce soit pour la couche de fondation ou la couche de base ou autre, le respect de la dimension des grains (classe des grains), du pourcentage en fines, de la forme et de la densité est importante pour garantir la performance et la durée de mise en fonction de l'ouvrage projeté, d'où l'importance des essais de contrôles des granulats.

II.3.2.5. Essai de contrôle des granulats

a) Analyse granulométrique par tamisage

L'essai permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon (Guyot, 2004).

Elle consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboitées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes de haut vers le bas. Le matériau étudié est placé sur la partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les analyses ont été effectuées sur des GCNT 0/60 et GCNT 0/40

Les courbes de répartition des grains en fonction de leur dimension sont représentées par les figures 21 et 22.

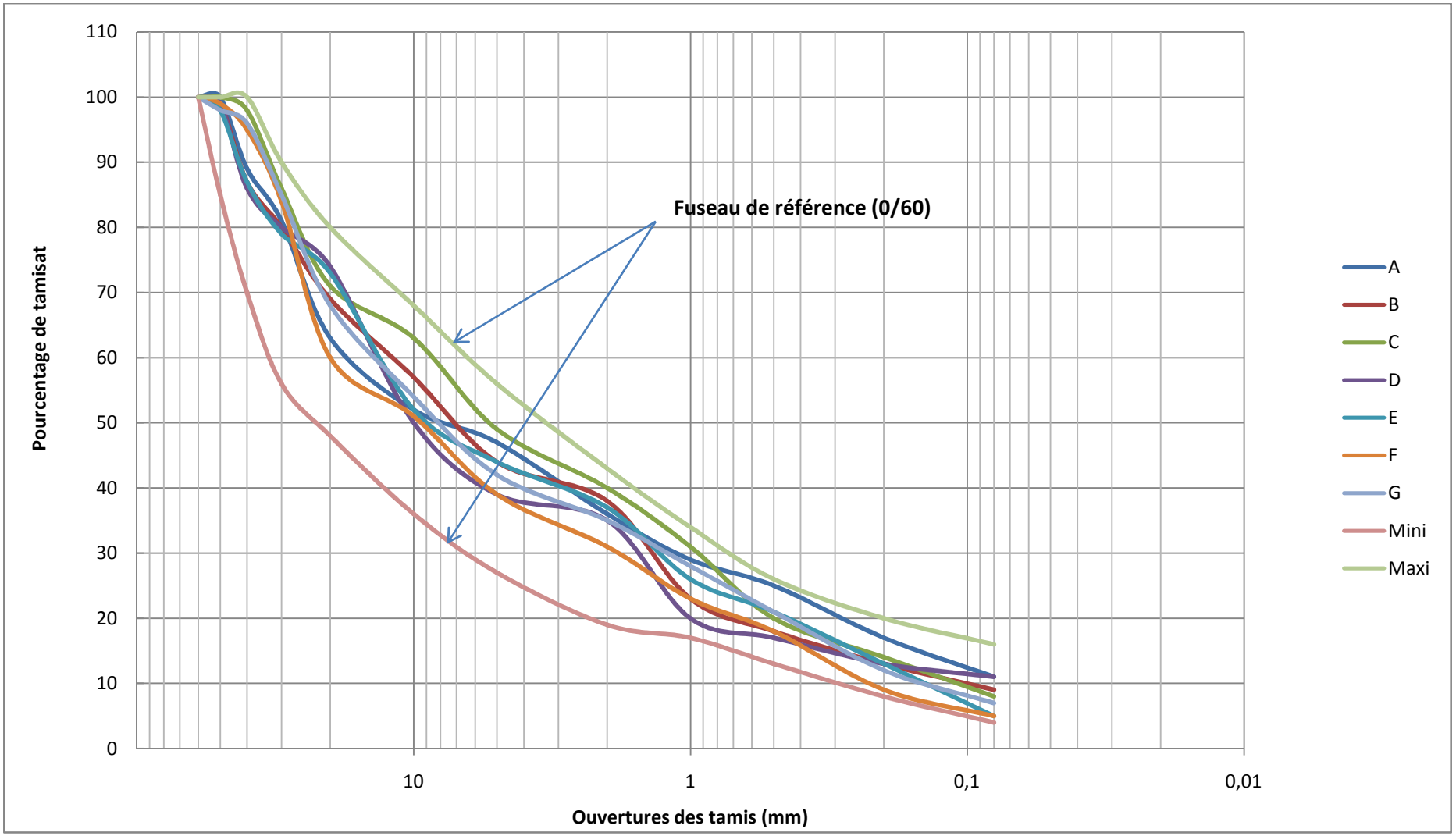


Figure 21: Courbe granulométrique pour la couche de fondation 0/60 et son fuseau de *référence*

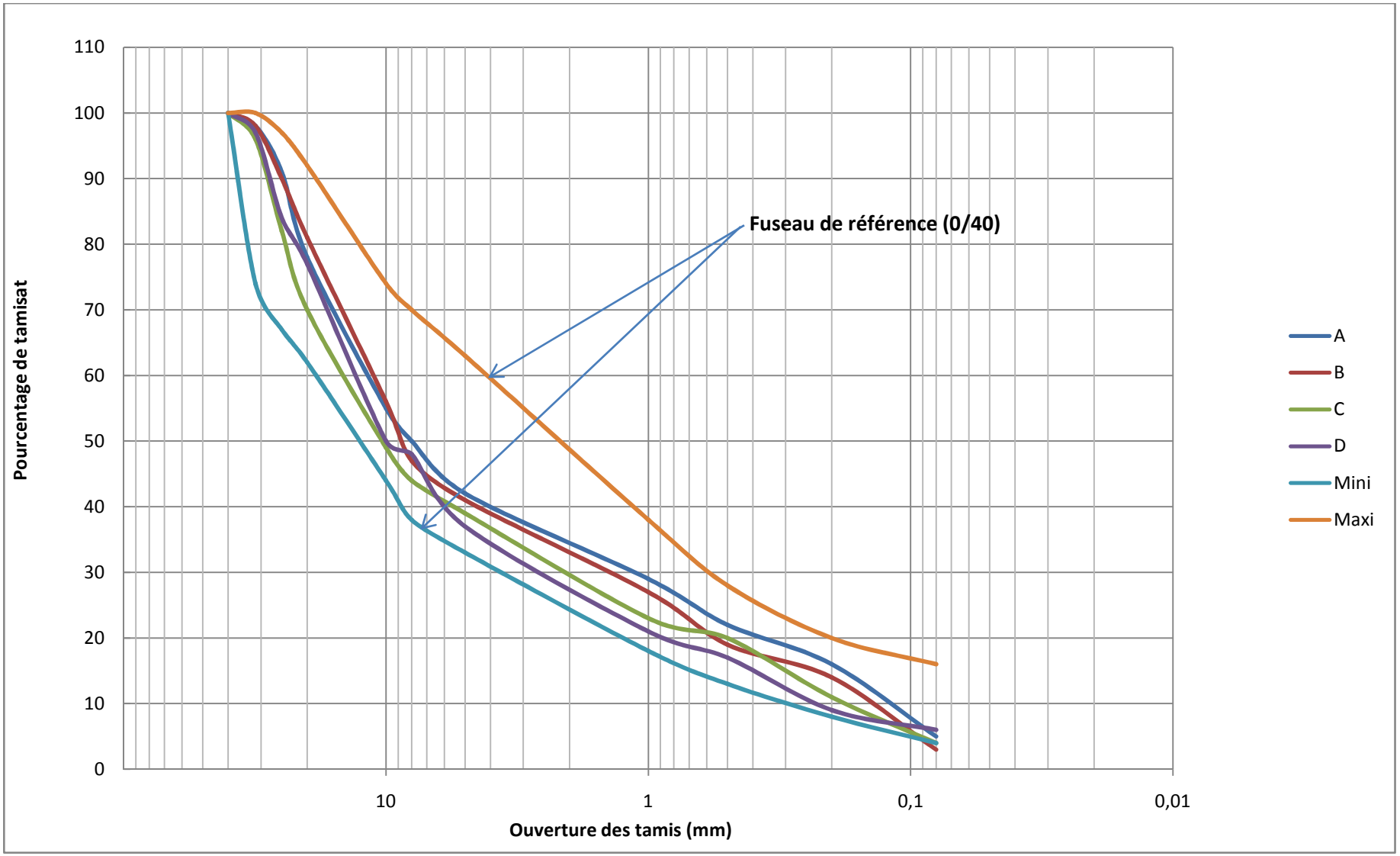


Figure 22: Courbe granulométrique pour la couche de base 0/40 et son fuseau de référence

Il est important de s'assurer de la granulométrie des échantillons avant et après leur mise en œuvre. Ainsi, la mise en place d'un fuseau de référence propre à chaque classe granulaire s'avère nécessaire. Les courbes doivent rentrer dans le fuseau de référence propre à chaque classe granulaire. L'idéal serait d'avoir des courbes granulométriques qui frôlent la partie supérieure du fuseau avant le compactage de tel sorte qu'après le compactage la courbe granulométrique reste toujours entre le maximum et la minimum du fuseau. En se référant aux figures 21 et 22, on constate que tous les échantillons rentrent dans leur fuseau de référence.

A l´issu de l'essai, il faut vérifier le pourcentage de fines car les particules fines influencent le comportement de la couche. La spécification pour les couches d'assises de la chaussée (couche de fondation et couche de base) doit être un pourcentage de fine entre 4 à 16%. Au-delà et en deçà de ces valeurs, les couches perdent leur performance mécanique. En plus, il peut y avoir une difficulté dans la mise en œuvre lors des travaux. Dans notre cas, selon le tableau récapitulatif des résultats de contrôle des granulats *tableau 16,* on a enregistré un pourcentage de fines allant de 5 à 11,5% pour la couche de fondation et de 4 à 6% pour la couche de base, qui sont des valeurs conformes à la spécification.

b) Equivalent de sable

Elle vise à évaluer le pourcentage de fines (particules inférieures ou égales à 80 µm) ou la propreté des granulats. . En effet, les fines diminuent la résistance de l'ensemble, d'où l'importance de contrôler leur proportion. Notons que plus l'équivalent de sable (ES) est faible plus le GCNT est riche en élément fin. La spécification pour le pourcentage de fines est le même pour les différentes couches d'assises, ES≥40. Les résultats dans le *tableau 16* nous montrent clairement que cette valeur à été suffisamment respectée avec un ES allant de 65 à 74 pour la couche de fondation et de 61 à 72 pour la couche de base.

c) Coefficient d'aplatissement

Elle permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats. C'est un essai qui se fait en parallèle avec l'analyse granulométrique par tamisage.Il suffit de faire passer le refus au tamis de l'échantillon de l'analyse granulométrique par tamisage à une série de grille correspondant à l'ouverture de chaque série de tamis. A part la dimension des granulats, leurs formes sont aussi importantes dans la technique routière. On éliminera les

granulats sous forme de plaquette qui se rompt facilement et qui ne possède pas une résistance suffisante pour supporter les contraintes répétés dues aux trafics. L'essai correspondant consiste à déterminer un coefficient dit coefficient d'aplatissement, la spécification requise est une valeur inférieure ou égale à 25. Dans notre cas cette valeur a été respectée. Le *tableau 16* montre qu'on a un CA inférieur à 20, correspondant à des granulats volumineux.

d) Poids spécifiques

Elle consiste à mesurer le rapport entre poids et le volume occupé par un échantillon. Le γ_s est la référence pour respecter le degré de compactage de 85% que l'on va comparer avec celle mesurée in-situ. La valeur de γ_s est plus ou moins égale pour une même formation ; par contre une différence est à observer pour des formations différentes. Le *tableau 16* montre les résultats obtenus lors des essais. On constate que l'échantillon provenant de R_2 a été utilisé comme couche de fondation. Sa valeur tourne autour de 2.72 t/m^3 pour le granite migmatitique et de 2.33 à 2.29 t/m^3 pour le granite à biotite.

Tableau 16: Résultats des essais de contrôle

Couche de Fondation (0/60)	**%<80µm**	**ES**	**CA**	**γ_s (T/m^3)**
Echantillon A	11	68	19	2.725
Echantillon B	9	69	18	2.725
Echantillon C	8	71	17	2.725
Echantillon D	11.5	74	19	2.735
Echantillon E	5	65	18	2.714
Echantillon F	5	73	20	2.362
Echantillon G	7	71	18	2.321
Spécification	**4 à 16**	**≥40**	**≤25**	
Couche de base (0/40)	**%<80µm**	**ES**	**CA**	**γ_s (T/m^3)**
Echantillon A	6	71	-	2.390
Echantillon B	4	61	-	2353
Echantillon C	5	72	18	2.384
Echantillon D	3	67	19	2.336
Spécification	**4 à 16**	**≥40**	**≤25**	

II.4. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE

Les matériaux constitutifs des différentes couches de la chaussée sont choisis en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et de leurs propriétés physiques. Le nombre de couche qui va la constituer, par contre est défini suivant le type de chaussée choisi. Pour prétendre que tel ou tel matériau est approprié à une couche de la chaussée, il doit impérativement faire l'objet d'une série d'essais au laboratoire. Ces essais ont permis de s'assurer de la conformité des matériaux vis-à-vis des spécifications imposées.

Pour les sols, la possibilité de leur utilisation dans la technique routière est conditionnée par leurs pourcentages de fines, leur indice de plasticité, et leur indice portant CBR.

Pour les matériaux rocheux, leurs utilisations dépendent de leur performance mécanique qui est déterminée par l'essai Los Angeles et Microdeval. Leur forme de préférence volumineuse leur permet de résister aux contraintes imposées par le trafic.

L'efficacité et la réussite des travaux dépendent de l'approche des problèmes imposés par le site et le respect des spécifications dans la mise en œuvre de chaque partie de la chaussée, ainsi que des ouvrages accessoires et des ouvrages de franchissement.

CHAPITRE III : PROPOSITION DE SOLUTIONS DURABLES

Ce chapitre a pour but de proposer :

- des solutions naturalistes et techniques à long terme vis-à-vis de l'environnement extérieur de la route et pour faire aux problèmes d'ensablement et d'inondation fréquent dans le milieu;
- des spécifications techniques à respecter lors de la mise en œuvre des travaux et le type d'ouvrage nécessaire aux fins de préserver une route en bonne état durant les années à venir.

III. 1. MESURE A PRENDRE FACE AUX PROBLEMES IMPOSES PAR LES SITUATIONS IN-SITU

III.1.1. Sur l'environnement de la route

L'érosion des versants est la principale cause de l'ensablement dans la zone. Elle conduit aussi à la formation des lavakas et à l'éboulement qui se manifeste dans la partie nord de la commune d'Andaingo. La première solution pour éviter ces désordres, et afin de protéger et de garantir la stabilité des versants à l'érosion, est la végétalisation. On peut penser à revégétaliser les versants à l'aide d'ensemencement spécifique et de plantation ligneux. La plantation de végétaux surtout le talus du déblai contribuerait à assécher le versant par l'évapotranspiration et à augmenter la résistance du sol au cisaillement. En effet, en retenant le sol par ses racines et en régulant la température et l'humidité, la végétation réduit fortement le jeu des dilatations et des contractions dans les couches superficielles (Lisan, 2010). L'association de graminées et d'acacias serait souhaitable, car les graminées ont un fort potentiel d'évapotranspiration alors que les acacias résistent bien à la sécheresse et retiennent bien les matériaux par leurs racines. Dans l'état actuel, enlever les sables qui comblent les rivières s'avère un bon début pour lutter contre l'ensablement qui affecte la plupart des zones de dépression.

Pour minimiser l'action de l'eau sur les versants (éviter la formation des lavakas et l'ensablement des bas fonds), on peut aussi organiser l'écoulement des eaux. On peut avoir recours à des ouvrages tels que les fossés et les drains.

- **Les fossés**

Leur fonction est d'acheminer l'eau. Ils n'ont pas pour vocation de retenir les sédiments : il faut donc les protéger des apports extérieurs, par exemple par une bordure

d'herbe de faible largeur et éviter que leur profil ne favorise les dépôts. Le fossé collecte principalement le ruissellement de la surface alimentant son point amont. La construction d'un fossé doit respecter les règles suivantes :

- la continuité hydraulique des écoulements doit être assurée ;
- les débits évacués doivent être compatibles avec ceux que peuvent supporter les réseaux de collecte des eaux pluviales en aval. Si ces conditions ne sont pas remplies, la construction du fossé ne ferait qu'aggraver les problèmes en aval ;
- le fossé doit être stabilisé par un enherbement ou un enrochement dans le cas des pentes fortes ;
- une bande enherbée doit être implantée sur 30 à 40 cm de large le long des bords, pour éviter leur destruction par les engins ou les outils et filtrer le ruissellement, car le fossé n'a pas vocation à recevoir de grandes quantités de sédiments ;
- le curage des fossés doit être effectué chaque fois que nécessaire, en évitant cependant les périodes où les risques de ruissellement sont élevés, car le curage mécanique détruit la végétation qui stabilise le fossé et celui-ci pourrait alors se transformer en ravine.

➢ **Les drains**

Un drain peut constituer une alternative au fossé. Cette solution a été proposée en exutoire des fossés sur les versants en pente forte. On leur associe tous les 50 m des cheminées d'infiltration obtenues en comblant localement la tranchée avec des matériaux filtrants (pierres concassées, graviers).

III.1.2. Sur la route

Dans les zones inondables la chaussée est submergé par l'eau pendant un certain lapse de temps. Une mise en place ou rehaussement de la digue est donc nécessaire pour remonter la chaussée hors de l'eau. La construction d'ouvrage de franchissement pour remplacer les ponceaux en bois est aussi envisageable pour faire face à l'inondation. Dans les zones de très basse altitude et constamment inondable (à l'entrée du village de Mandrota), la solution pérenne et efficace est la construction d'un radier pour circuler l'eau et en même temps assurer la fluidité du trafic.

L'état boueux pendant la saison de pluie et poussiéreux de la route pendant la saison sèche montre que la route doit être revêtue et que l'eau qui s'accumule sur l'axe doit être évacuée. Pour faciliter l'évacuation des eaux, à part une chaussée revêtue, il faut aussi envisager à procéder à la construction ou réhabilitation des ouvrages de décharge.

III.2. CONTRIBUTION DE LA GEOTECHNIQUE

III.2.1. Remblayage

L'opération vise à rehausser le niveau de la chaussée par apport de matériau meuble comme le Mélange M (*tableau 12*). Une des causes de coupure de l'axe est la remontée du l'eau qui tend à submerger la chaussée située sur une petite digue en terre. Pour éviter la formation de boue sur la chaussée constamment inondée, rehausser la digue est une solution envisageable. Le matériau S_{14} se trouve à proximité de la digue et il a les caractères suffisants pour être utilisé en remblai (*tableau 10*).

Une fois mis en place, le remblai doit être suffisamment compacté (95% de l'OPM) pour le rendre imperméable à l'eau et lui donner une bonne portance.

III.2.2. Ouvrage de décharge et de franchissement

III.2.2.1. Ouvrage de décharge

Pour protéger la chaussée de l'action de l'eau, un aménagement de l'accotement et des ouvrages de décharge peut être efficace au fin d'assurer le drainage pour éloigner l'eau. Ce sont les accotements, les saignées, les fossés, les dalots.

a) Les accotements

Elles doivent empêcher l'introduction de l'eau par le côté de la chaussée. Très souvent, certains accotements perméables et qui sont en contact avec le corps de la chaussée reçoivent les précipitations er transmettent l'eau à la partie inférieure de la chaussée ; d'où l'intérêt de la rendre imperméable en la recouvrant d'un produit noir. Elles doivent être au même niveau que la surface supérieure de la chaussée avec une pente suffisamment forte pour évacuer l'eau directement du fossé.

b) Les saignés

Les saignés doivent être largement évasées de manière à ne pas former une gouttière brutale dans l'accotement mais pour avoir des pentes assez douces.

c) Les fossés

Ils sont les ouvrages les plus importants dans l'évacuation des eaux. Ces types d'ouvrages doivent être en béton armé et en pente pour permettre l'écoulement de l'eau vers l'exutoire ou dans des ouvrages tels que les dalots.

Le type de fossé choisi doit dépendre du lieu desservi et du débit à évacuer. Dans les traversés des villages, par exemple, on peut adopter les fossés rectangulaires (Figure 23) en béton armé tandis que dans les rases campagnes, on peut avoir les fossés triangulaires (Figure 24) car les débits à évacuer sont moins importants.

Les figures ci-dessous nous montrent les profils types de chaussée à adopter dans les différents endroits traversés par la route et les types de fossés appropriés.

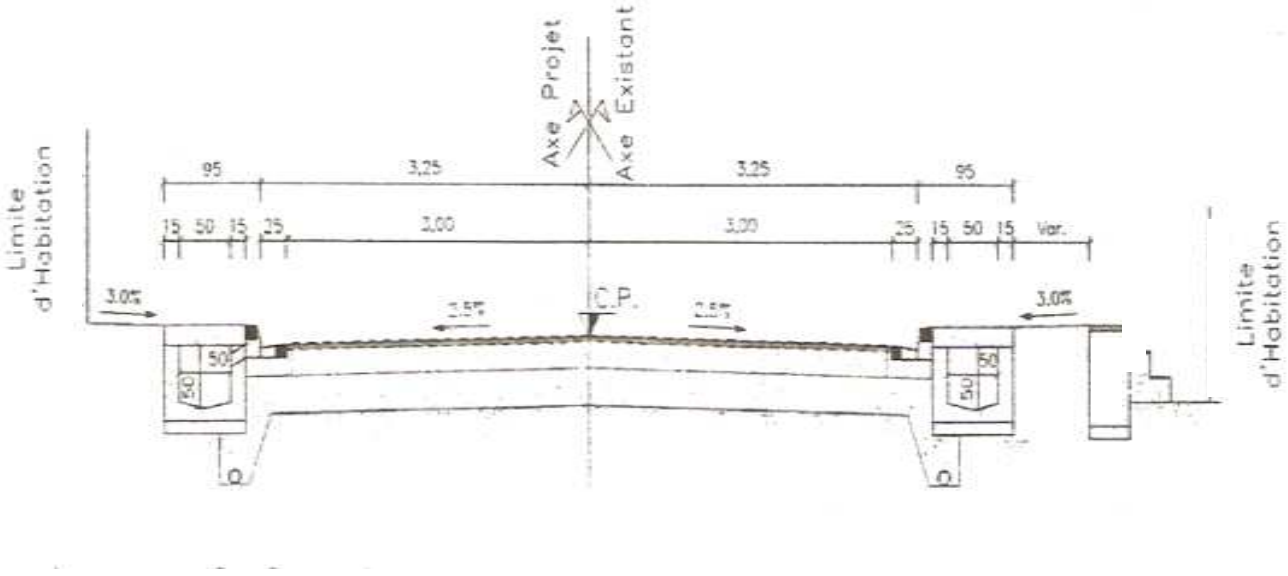


Figure 23: Profil en travers type en traversée de village (Fossé rectangulaire)

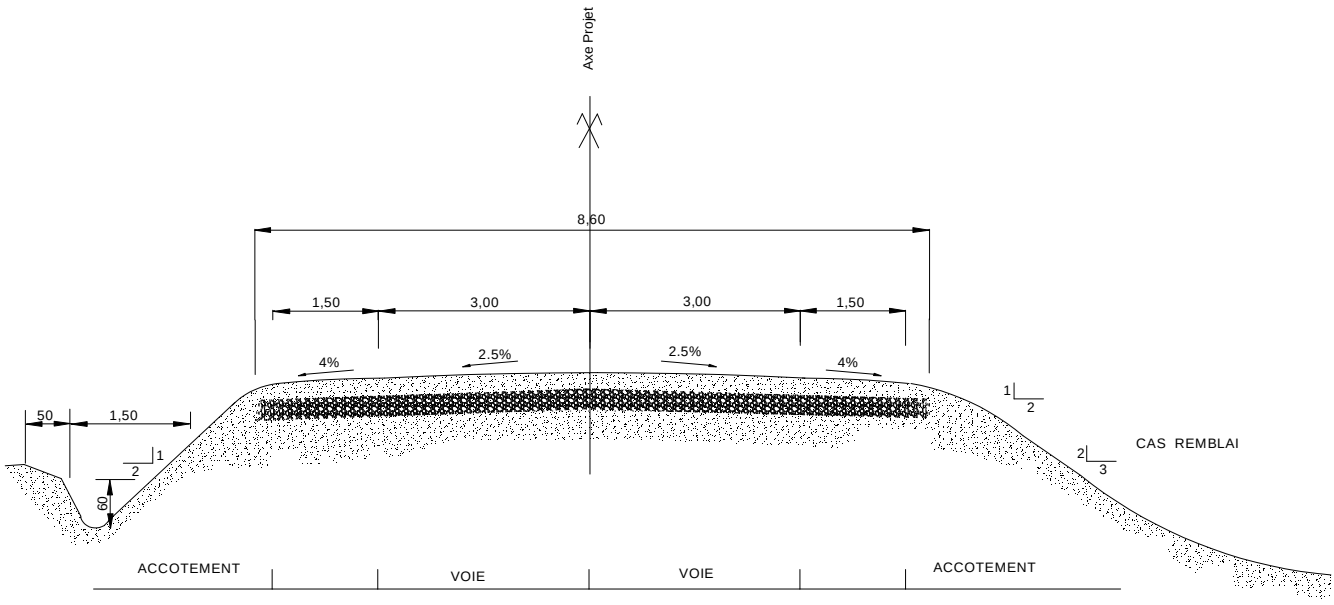


Figure 24: Profil en travers type en rase campagne (Fossé triangulaire)

d) Les dalots

Les dalots sont des ouvrages transversaux comme les buses mais de section rectangulaire ou carrée et exécutés exclusivement en béton armé. Ce sont des ouvrages sous chaussée qui ne nécessitent aucun remblai; une circulation à même la dalle peut être envisagée moyennant des précautions lors de la construction; ils ne peuvent admettre qu'une faible épaisseur de remblai (1 à 2m), à moins d'être calculés spécialement pour les surcharges. Si la chaussée est à revêtir, ces remblais doivent être proscrits.

Du point de vue structurel, trois types de dalots peuvent être projetés:

- les dalots ordinaires: constitués de pieds droits verticaux fondés sur semelle ou radier général et sur lesquels repose une dalle en béton armé;
- les dalots cadres : dans les quels la dalle, les pieds droits et le radier constituent une structure rigide en béton armé;
- les dalots portiques: analogues aux dalots cadres mais sans radier, les

pieds droits étant fondés sur semelles.

Les dalots sont en général adoptés pour des débits Q > 10m^3/s. Mais les débits admissibles sont variables et peuvent être très élevés et dans ce cas, on adopte une batterie de dalots ou de buses quand la topographie du site permet un tel dispositif (CEBTP et BCEOM, 1992).

III.2.2.2. Ouvrage de franchissement

Dans le cas de l'inondation observée dans nombreux tronçon de l'axe, il faut procéder à la construction d'ouvrage de franchissement et/ou au remplacement des existants par des ouvrages beaucoup plus durs et pouvant résister à une forte crue. Ainsi, la circulation des biens et des personnes est toujours possible durant toute l'année.

Parmi ces ouvrages, on a les radiers (recommandés à l'entrée du village de Mandrota), les ponts en bétons armés (en remplacement des ponceaux en bois) et les ponts en acier (pour franchir les rivières à gorge étroite).

a) Radiers

Un radier est un ouvrage qui permet de franchir les rivières en basses eaux et qui est submergé en cas de crues ou dans les zones constamment inondées. Les radiers sur les axes importants sont prévus en béton armé. Le radier lui-même est ancré dans le sol et est protégé en amont comme en aval contre l'érosion régressive par un tapis de gabions ou un enrochement (CEBTP et BCEOM, 1992).

Des balises de signalisation sont placées à l'entrée et à la sortie du radier, ainsi que sur les côtés. Elles permettent de signaler la présence de l'ouvrage et de délimiter les usagers. Il s'agit généralement de piliers en béton armé peints en rouge et blanc d'environ 1,50m de hauteur.

A l'entrée du village de Mandrota, l'inondation empêche la circulation des véhicules et des personnes pendant des heures. La mise en place de ce type d'ouvrage contribue largement à améliorer la circulation et l'évacuation des richesses de la région entière.

b) Pont en béton armée et pont Bailey:

Le pont est un ouvrage qui permet de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voies de communication) en passant par-dessus. Les ponceaux en bois sont submergés par l'eau, leurs facultés à assurer la circulation des véhicules sont remises en

cause. L'eau détériore le bois et augmente le risque de rupture de l'ouvrage. Le remplacement de ces ponceaux par des ponts en béton armé est à envisager.

Une gorge étroite et un débit élevé en période de pluie intense des ouvrages tels que les ponts en béton armée et les ponts Bailey sont appropriés. Ces divers ouvrages sont envisageables et réalisables dans le secteur.

La chaussée doit être bien protégée de l'action de l'eau car tous les désordres qui affectent une route sont étroitement liés à elle. Pour cela une chaussée doit être revêtue et chaque couche qui la constitue doit être bien compactée. En effet, le compactage en plus de donner de la portance contribue aussi à imperméabiliser la couche. Il vise avant tout à diminuer le tassement sous l'effet des chargements par rapprochement des grains du matériau les uns eux autres, donc resserrement des pores. Puis une amélioration des caractéristiques mécaniques par le biais du frottement interne qui se produit par une répartition des charges ; donc une augmentation des résistances à la compression. Ensuite, une diminution de la perméabilité par une diminution des pourcentages de vide. Ainsi, on évite les désordres liés à l'action de l'eau. Enfin, diminution de l'attrition des matériaux car les mouvements entre les divers éléments du matériau de couche de chaussée sont presque insignifiants, vu le resserrement des vides qu'on provoque. La vérification de cette compacité lors de la mise en œuvre est donc nécessaire.

III.2.3. Mise en œuvre et contrôle sur chaque couche

Les contrôles effectués portent surtout sur la compacité de chaque couche. En effet, le compactage est une étape importante pour donner la portance suffisante pour supporter les contraintes imposées par le trafic et une imperméabilité à l'eau. Le compactage est conditionné par la teneur en eau de l'échantillon.

III.2.3.1. Compactage

C'est l'ensemble des procédés essentiellement mécaniques mis en œuvre pour améliorer les performances du sol ou du matériau auquel on applique des contraintes. On aura évidement une déformation qui affecte largement les caractéristiques intrinsèques des matériaux (Arquie et Roude, 1979).

Elle réduit le pourcentage de vide contenu dans l'échantillon par resserrement des pores et réarrangement des grains ; d'où une diminution des risques de tassement. Ce

resserrement est accompagné d'une augmentation de la densité apparente sèche donc de la performance du matériau. On note aussi une liquéfaction des sables soumis à une vibration.

Succinctement, l'objectif du compactage des couches de la chaussée se résume comme suit :

D'abord diminuer le tassement sous l'effet des chargements par rapprochement des grains du matériau les uns eux autres donc resserrement des pores. Puis une amélioration des caractéristiques mécaniques (portance) par le biais du frottement interne qui se produit par une répartition des charges, donc une augmentation des résistances à la compression. Ensuite, une diminution de la perméabilité par une diminution des pourcentages de vides, ainsi on évite les désordres liés à l'action de l'eau. Enfin, diminution de l'attrition des matériaux car les mouvements entre les divers éléments du matériau de couche de chaussée sont presque insignifiants vu le resserrement des vides qu'on provoque (Arquie et Roude, 1979).

Pour avoir la compacité voulue, il faut la réalisation d'une planche d'essai. Il s'agit de déterminer le nombre de passe nécessaire pour avoir la compacité voulue pour un tronçon homogène. On prendra par exemple un tronçon de 100 m et on compte le nombre de passe effectué par l'engin (Exemple Pneumatique ou Vibrante). Ensuite, on vérifie la compacité et on la compare avec la valeur de référence. Si cette valeur est égale ou supérieure à la valeur de référence, on adopte ce nombre de passe pour les tronçons homogènes. Dans le cas contraire, on ajoute le nombre de passe et on vérifie jusqu'à l'obtention de la valeur désirée.

Le compactage se fait en fonction du degré de saturation et de la perméabilité de l'échantillon. Un degré de saturation élevé entrainerait le phénomène de matelassage ou du coussin de caoutchouc pour un matériau imperméable (Arquie et Roude, 1979). C'est un phénomène qui est fonction de la teneur en eau, une bonne teneur en eau favoriserait l'opération. Cependant, dans le cas d'absence ou d'excès d'eau, l'opération devient très difficile, voire impossible.

L'eau est un facteur déterminant dans les conditions de compactage, les cas suivants nous permettent mieux de comprendre le mécanisme du compactage. En effet, l'eau crée une pression interstitielle dans le matériau qui favorise le phénomène; considérons un sol pulvérulent auquel on compacte en appliquant une contrainte $\sigma 1 - \sigma 3$ et en supposant que le sol est très drainé. La condition de drainage entraine une suppression de la pression

interstitielle, d'où l'impossibilité du compactage puisque u=0 donc σ1= σ1' et σ3= σ3' (Arquie et Roude, 1979).

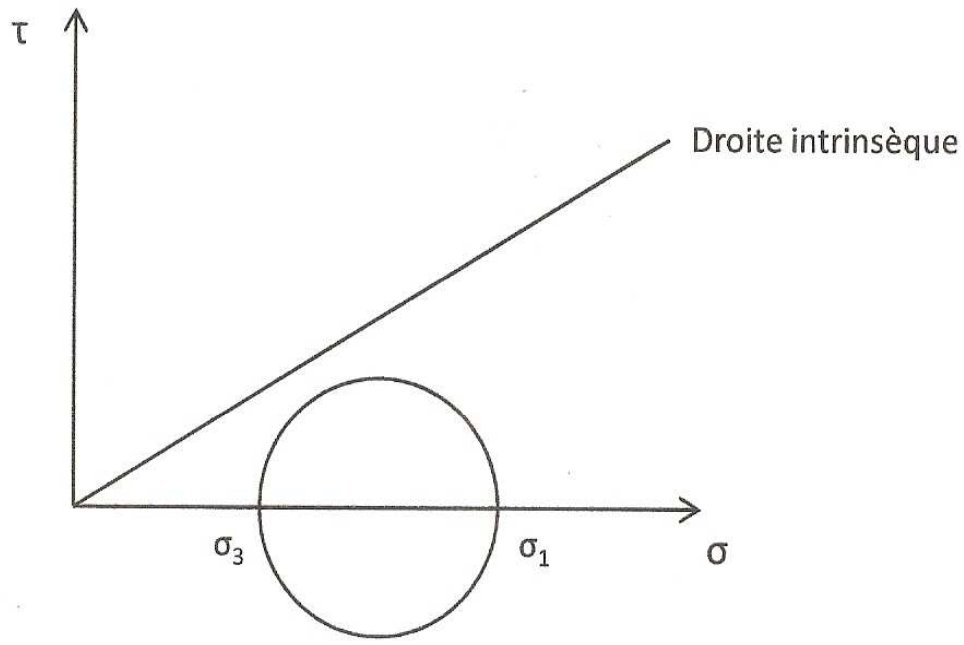


Figure 25: Compactage d'un sol pulvérulent et bien drainé (par une contrainte σ1- σ3)

On constate que le cercle de Mohr n'a pas touché la droite intrinsèque (Figure 25), d'où la difficulté de compactage. Par contre, en supposant que le sol est peu drainé, on a une pression interstitielle qui tend à rapprocher le cercle de Mohr à la droite intrinsèque et augmentation, en même temps, de la valeur de τ. Ce déplacement témoigne le cisaillement qui a eu lieu, donc compactage.

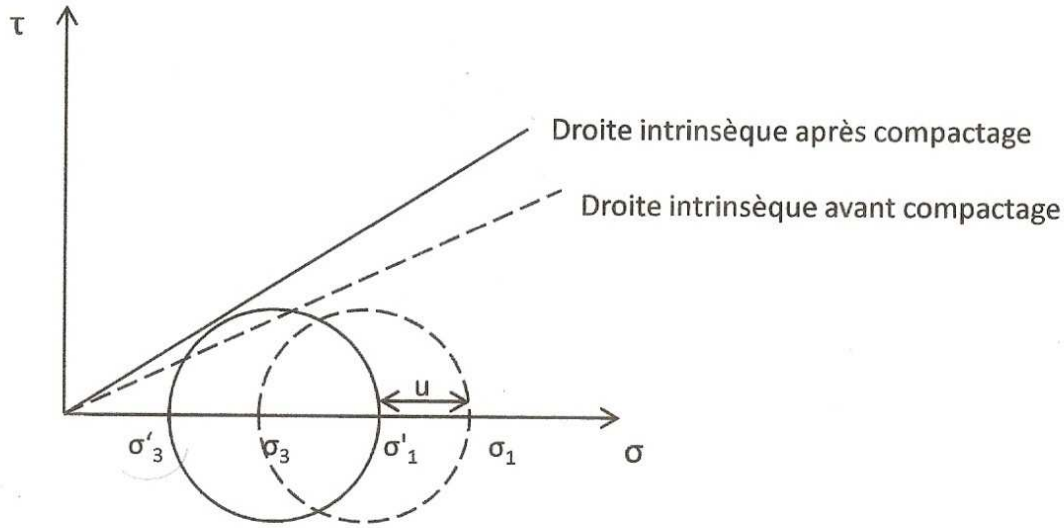


Figure 26: Compactage d'un sol peu drainer (par une contrainte σ1- σ3)

Cette courbe (Figure 26) montre que la pression interstitielle favorise le compactage matérialisé ici par le rapprochement du cercle de Mohr à la droite intrinsèque.

La facilité de compactage est possible à appréciée par l'écart entre la teneur en eau naturelle et la teneur en eau optimum, l'indice CBR à teneur en eau naturelle et l'indice de consistance. Mais dans le cas présent, l'indice CBR à teneur en eau naturelle est rarement effectué.

Plus l'écart entre la teneur en eau naturelle et la teneur en eau optimum est grande, plus elle nécessite de plus grande énergie pour un gain de compacité de plus en plus faible.

Etant donnée l'importance du compactage sur la pérennité de la roche, une étude de contrôle s'impose. La manière la plus utilisé reste la vérification du taux de compactage par mesure du poids spécifique apparente du sol (ou matériaux) in situ et la comparer avec la valeur de référence obtenue au laboratoire selon le type de matériaux. On peut aussi l'apprécier par la mesure des déformations produites sous le passage d'une surcharge, mesure de déflexion (Arquie et Roude, 1979).

Après avoir déterminé les caractéristiques des matériaux (au laboratoire) et le contexte de la zone d'étude, on procède à la mise en œuvre sur chantier, contrôlé étape par étape et couche par couche.

La mise en œuvre des matériaux in-situ dépend de la taille des éléments et des moyens existants. Une des difficultés qui se présente est la détermination du nombre de passes requises pour avoir la compacité imposée pour chaque couche et matériaux qui la constituent.

Le tableau ci-dessous ***(****Tableau 17****)*** nous donne les valeurs de la compacité admissible pour chaque couche et matériaux qui la constituent.

Tableau 17: Valeurs de la compacité admissible pour chaque couche en fonction des matériaux qui la constituent.

Couche	Valeur de la compacité (en %)
Couche de fondation :	
En matériaux sélectionnées	95% de l'OPM
En GCNT (0/60)	85% du γ_s
Couche de Base	
En GCNT (0/40)	85% du γ_s

III.2.3.2. Mise en œuvre et contrôle de la couche de fondation

Nous avons utilisé 2 types de matériaux pour la couche de fondation. La première est constituée par des matériaux meubles et la seconde par des GCNT (0/60).

a) Couche de fondation en Matériaux sélectionnés

- Mise en œuvre :

Les matériaux utilisés sont ceux issus du mélange dans le *tableau 12.*Pour la mise en œuvre, on doit avant tout déterminer le nombre de passes nécessaires pour avoir la compacité de 95% de l'OPM imposée, d'où la nécessité de faire des planches d'essais.

La planche d'essai a pour objectif de déterminer le nombre de passe pour avoir la compacité voulue et l'appliquer à l'ensemble de la zone présentant les mêmes caractéristiques. Compte tenu de la performance des engins, la couche de fondation est réalisée en 2 temps. D'abord, on délimite une zone de planche d'essais (100m par exemple) par des piquets en bois (piquetage de la zone de planche d'essai), puis on procède à l'étalage des matériaux à la niveleuse sur toute la largeur de la chaussée. Pour avoir un mélange

homogène, on malaxe le tout à l'aide de la niveleuse puis on l'arrose à l'aide d'un camion citerne. Une remise en forme du profil en large de la chaussée est alors exécutée afin d'avoir l'épaisseur foisonnée voisine de 20cm sur toute la largeur. Ensuite, le compacteur effectue le passe de fermeture. Pour terminer, on procède à une série de passes suivie d'un contrôle de compacité et de mesure du γ_d.

- Résultat de la Planche d'essai :

Les résultats ci-dessous sont obtenus sur une planche d'essai de 100 m répartie en 4 zones dont le nombre de passes est différent sur les matériaux sélectionnés (Première couche de 15 cm).

Tableau 18: Résultats de la planche d'essais pour la couche de fondation en Matériaux sélectionnés

Zone	Nombre de Passes	Référence	Mesure in-situ				
			Emplacement essai	γ_d (kN/m^3)	ω (%)	Compacité (%)	Epaisseurs (cm)
A	2V + 8P	$\gamma_{d\ opm}$=21.12 kN/m^3 ω=8.7%	Gauche	20.34	9.9	96.3	15.0
			Axe	20.17	10.3	95.5	14.0
			Droite	20.02	10.4	94.8	16.0
B	2V + 10P		Gauche	19.81	9.8	93.8	15.0
			Axe	19.79	10.1	93.7	16.0
			Droite	19.77	9.4	93.6	14.0
C	2V + 12P		Gauche	19.64	9.7	93.0	16.0
			Axe	19.77	8.9	93.6	14.0
			Droite	19.70	10.5	93.3	14.0
D	2V + 14P		Gauche	19.54	8.7	92.5	15.0
			Axe	19.45	12.5	92.1	15.0
			Droite	19.51	9.0	92.4	15.0

Le tableau 18 montre que la compacité de 95% de l'OPM est obtenue à 2 passes au rouleau vibrant CAT CS 583 C et 8 passes au pneumatique SAKAI. Augmenter le nombre de passe ne fait que diminuer le γ_d in-situ, d'où de la compacité causée probablement par le broyage du matériau.

Le nombre de passes ainsi obtenu est donc adopté pour l'ensemble de la couche de fondation en matériaux meubles. A la fin de la mise en œuvre, on procède au contrôle de compacité.

– Contrôle de compacité :

A la fin des travaux de mise en œuvre, la couche de fondation est contrôlée avant de mettre en place la couche suivante. La norme exigée est de 95% de l'OPM, en dessous de cette valeur le tronçon doit être de nouveau compacté voire scarifié.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 18ci-après :

Tableau 19: Mesure de compacité sur la couche de fondation en matériaux meubles

Pk	côté	Référence		Mesure in-situ		Compacité (%)	Epaisseurs (cm)
		$\gamma_d$opt (kN/m^3)	Wopt (%)	γ_d(kN/m^3)	ω (%)		
74+650	Axe	21.12	8.7	20.03	8.6	94.8	15
74+775	Gauche	""	""	20.0	8.1	95.1	16
74+875	Axe	""	""	20.35	7.5	96.4	16.5
74+975	Droite	""	""	20.27	7.9	96.0	16
75+075	Axe	""	""	20.01	10.9	94.7	15
75+175	Gauche	""	""	20.18	11.6	95.5	16
75+275	Axe	""	""	20.07	11.3	94.9	15
75+375	Droite	""	""	20.05	10.8	95.8	15
75+475	Axe	""	""	20.23	11.3	95.9	16
75+575	Gauche	""	""	20.26	10.9	97.5	16
75+675	Axe	""	""	20.59	11.2	96.2	15.5
75+775	Droite	""	""	20.32	10.9	95.9	15.7
75+875	Axe	""	""	20.26	11.4	95.1	16.5
75+975	Gauche	""	""	20.14	9.9	96.3	16.5
76+075	Axe	""	""	20.25	11.6	95.2	19.0
76+175	Droite	""	""	20.08	11.3	96.4	20.0
76+275	Axe	""	""	20.33	6.8	96.3	21.0
76+375	Gauche	""	""	20.11	8	95.2	19.5
76+475	Axe	""	""	20.35	10.4	96.4	20.6
76+575	Droite	""	""	20.46	8.5	96.9	20
76+775	Gauche	""	""	20.06	9.2	95.0	22
76+875	Axe	""	""	20.42	11.5	96.7	19.5
76+975	Droite	""	""	20.34	11.3	96.3	20.5

D'après les résultats, la compacité de 95% à été respectée sur l'ensemble de la couche. Nous pouvons donc procéder à la suite des travaux qui est la mise en place de la couche de base.

b) Couche de fondation en GCNT 0/60

- Mise en œuvre :

Le matériau qui constitue cette couche provient de la carrière de Marohady. La compacité est mesurée en fonction du γ_s obtenu au laboratoire. On exige une compacité au moins égale à 85% de γ_s (MTPM, 2011). Comme précédemment, la réalisation d'une planche d'essais est primordiale afin de fixer le nombre de passes nécessaires pour avoir une compacité de 85% de γ_s.

Lors de la planche d'essais on a procédé comme suit :

- délimitation de la zone de planche d'essais ;
- mise en tas de matériau (GCNT 0/60) ;
- etalage sur toute la largeur par la niveleuse ;
- arrosage avec un aller-retour au camion citerne;
- malaxage et mise en forme du profil en travers ;
- une série de passes avec le rouleau vibrant et l'engin pneumatique afin de fixer le nombre nécessaire pour avoir la compacité voulue.

Nous avons donc réalisé une planche d'essai de 100 m divisée en 4 zones afin de déterminer le nombre de passes à adopter sur l'ensemble de la couche.

En faisant la moyenne entre les différentes valeurs du γ_s in-situ compte tenu du nombre de passes on peut voir une augmentation de cette valeur, il y a donc resserrement des grains et diminution du pourcentage de vide. Compte-tenu des résultats obtenus (Tableau 20), le nombre de passes à adopter pour l'ensemble de la couche homogène est donc de 4 passes au rouleau vibrant CAT CS 583 C et 12 passes au pneumatique SAKAI.

Tableau 20: Résultat de la planche d'essai pour la couche de fondation en GCNT 0/60

Zone	Nombre de Passes	Référence Poids spécifique γ_s(kN/m^3)	Mesure in-situ				
			Emplacement essai	γ_s (kN/m^3)	ω (%)	Compacité (%)	Epaisseurs (cm)
A	4V + 6P	27.14 kN/m^3	Gauche Axe Droite Moyenne : 23.01	23.12 22.99 22.93	10.0 9.9 11.0	85.2 84.7 84.5	28.9 29.0 26.9
B	4V+ 8P		Gauche Axe Droite Moyenne : 23.15	23.07 23.20 23.18	11.3 10.8 11.2	85.0 85.5 85.4	26.9 28.9 27.0
C	4V + 10P		Gauche Axe Droite Moyenne : 23.22	23.12 23.26 23.23	11.6 11.1 11.5	85.2 85.7 85.6	26.8 26.8 26.5
D	4V + 12P		Gauche Axe Droite Moyenne : 23.26	23.18 23.31 23.29	11.8 12.2 11.7	85.4 85.9 85.9	28.8 26.8 28.9

- Contrôle de compacité :

L'objectif est d'avoir une compacité de 85% de γ_s ; des corrections sont à apporter pour les tronçons qui n'atteignent pas cette valeur. Pour ce faire, on a donc fait des contrôles sur les tronçons terminés avant de continuer les travaux.

Tableau 21: Mesure de compacité sur la couche de fondation en GCNT 0/60

PK	Coté	Mesures in-situ		γs Réf (kN/m^3)	Compacité %	Epaisseur (cm)
		γ_s (kN/m^3)	ω%			
77+075	Gauche	23.47	5.4	27.35	85.8	26.8
77+125	Axe	23.64	5	""	86.4	26
77+225	Droite	23.42	4.5	""	85.6	27
77+325	Axe	23.60	5.2	""	86.3	28
77+425	Gauche	23.90	4.9	""	87.4	27
77+650	Axe	23.46	4.3	""	85.8	27
77+660	Gauche	23.82	5.1	""	87.1	26
77+760	Axe	23.84	5.4	""	87.2	27
77+860	Droite	23.48	5.2	""	85.9	26.5
77+960	Gauche	23.340	4.9		85.6	28.3
78+075	Axe	23.54	5.0	27.14	86.1	25.4
78+175	Gauche	23.71	6.5	""	87.4	25.6
78+275	Axe	23.69	5.9	""	87.3	26.7
78+375	Droite	23.56	7.6	""	86.8	26
78+475	Axe	23.09	7.1	""	85.1	27.8
78+575	Gauche	23.98	7.3	""	88.4	25.5
78+675	Axe	23.35	4.9	27.35	85.1	27
78+815	Axe	23.60	5	27.14	87.0	27.2
78+940	Gauche	23,35	4,7	27,25	85,7	26
79+040	Axe	23,62	4,4	""	86,7	27
79+140	Droite	23,29	4,5	""	85,5	25,5
79+240	Axe	23,68	4,6	""	86,9	27,2
79+340	Gauche	23,32	4,6	""	85,6	26,5
79+440	Axe	23,54	4,9	27,25	86,4	27
79+540	Droite	23,6	4,4	""	86,6	26
79+640	Axe	23,7	4,6	""	87	27,5
79+740	Gauche	23,35	4,5	""	85,7	26,7
79+840	Axe	23,54	4,8	27,25	86,4	12,5
79+940	Droite	23,73	4,7	""	87,1	13,7
80+040	Axe	23,68	4,8	""	86,9	15

Les résultats obtenus (Tableau 21) sont conformes à la spécification de la couche, et on peut donc passer aux travaux de mise en place de la couche de fondation en GCNT 0/40. L'épaisseur de la couche au pk 79+840 jusqu'au pk 80+040 de moins de 15 cm est due au passage dans une zone cloutée épaisse.

III.2.3.3. Couche de Base en GCNT 0/40

- Mise en œuvre :

Elle est constituée par du granite à biotite (tableau 14) de la classe granulaire 0/40. La planche d'essais est réalisée sur une longueur de 100 m comme précédemment, divisée en 4 zones qui sont compactées à différents nombre de passes, puis contrôlée afin de fixer le nombre de passes nécessaire pour satisfaire à la spécification.

Pour la planche d'essai on a procédé de la manière suivante :

- mise en place de la zone de planche d'essai ;
- mise en tas de matériaux 0/40 ;
- on étale le matériau 0/40 sur toute la largeur de la chaussée à la niveleuse ;
- arrosage à la citerne ;
- malaxage ;
- série de passes avec le rouleau vibrant et au pneumatique afin de fixer le nombre nécessaire pour avoir la compacité voulue.

Les mesures sur les 4 zones de la planche d'essais servent de base pour l'ensemble de la couche homogène. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessus :

Tableau 22: Résultat de la planche d'essai pour la couche de base en GCNT 0/40

Zone	Nombre de Passes	Référence Poids spécifique γ_s (kN/m^3)	Mesure in-situ				
			Emplacement essai	γ_s (kN/m^3)	ω (%)	Compacité (%)	Epaisseurs (cm)
A	4V + 4P	27.66 kN/m^3	Gauche Axe Droite	23.44 22.45 22.44 Moyenne : 23.45	5.7 4.7 5.0	84.7 84.8 84.7	20.0 20.0 20.0
B	4V+ 6P		Gauche Axe Droite	23.90 23.86 23.77 Moyenne : 23.84	3.5 4.4 5.0	86.4 86.3 85.9	20.0 22.0 20.0
C	4V + 8P		Gauche Axe Droite	23.87 23.60 23.87 Moyenne : 23.78	3.2 3.7 4.2	86.3 85.3 86.3	20.0 22.0 20.0
D	4V + 10P		Gauche Axe Droite	23.33 23.41 23.35 Moyenne : 23.36	4.4 4.0 4.2	84.3 84.6 84.4	20.0 22.0 20.0

Les valeurs de γ_s moyennes in-situ sont assez variées (Tableau 22). La valeur maximale est obtenue à 4V + 6P puis très basse à 4V + 10P. L'excès de compactage augmente le pourcentage de fines des matériaux ; d'où la compacité s'avère non conforme à la spécification. Elle est conforme entre 4V + 6P et 4V + 8P avec des valeurs de γ_s élevés, le nombre de passes à adopter est donc de 4 passes au rouleau vibrant CAT CS 583 C et 7 passes au pneumatique SAKAI.

- Contrôle de compacité :

Les mesures ci-dessus sont faites en fonction de la γ_s, en dessous de 85% de γ_s ; on doit procéder au recompactage de la zone concernée voire même la scarification.

Tableau 23: Mesure de compacité sur la couche de Base en GCNT 0/40

Pk	Côté	Mesure in-situ		Référence OPM	Compacité	Epaisseurs (cm)
		γ_d (kN/m^3)	ω (%)	$\gamma_{d\ opt}$ (kN/m^3)		
74+650	Axe	23.68	5.7	27.56	85.9	27
74+750	Gauche	23.53	4.5	""	85.4	26
74+850	Axe	23.63	5.3	""	85.7	25
74+950	Droite	23.79	5.6	""	86.3	27
75+050	Axe	23.90	4.9	""	86.7	26.7
75+150	Gauche	23.69	5.1	""	86.0	25.7
75+250	Axe	23.57	4.7	""	85.5	27
75+350	Droite	23.8	5.8	""	86.4	26
75+500	Axe	23.70	5.8	27.66	86.1	26
75+600	Droite	23.90	6.1	""	85.3	26.5
75+700	Axe	23.92	6.0	""	85.2	27
75+800	Gauche	23.60	5.7	""	85.8	26.5
75+900	Axe	23.58	6.0	""	86.1	27
76+050	Axe	23.60	4.9	27.50	86.5	26
76+150	Gauche	23.69	5.0	""	86.5	26
76+250	Axe	23.79	4.7	""	85.7	26
76+325	Axe	23.80	5.6	""	86.5	25
76+425	Gauche	23.56	5.4	""	85.7	26.5
76+525	Axe	23.50	4.9	""	85.5	26
76+625	Axe	23.69	5.5	""	86.1	26
76+725	Droite	23.70	5.7	""	86.2	26
76+825	Axe	23.50	5.0	""	85.5	26
76+925	Gauche	23.59	5.2	""	86.8	27
79+975	Droite	23.90	4.4	""	86.9	26.5
77+100	Axe	23.79	5.6	""	86.5	20.0
77+200	Gauche	23.80	5.4	""	86.5	20.5
77+300	Axe	23.68	4.8	""	86.1	21
77+400	Droite	23.90	5.3	""	86.9	20
77+500	Axe	23.59	4.8	""	85.8	20.4
77+600	Axe	23.60	5.1	""	85.8	20.0
77+680	Axe	23.71	5.4	""	86.2	20
77+700	Axe	23.50	5.3	""	85.5	20.5

Pk	Côté	Mesure in-situ		Référence OPM	Compacité	Epaisseurs (cm)
		γ_d (kN/m^3)	ω (%)	$\gamma_{d\ opt}$ (kN/m^3)		
77+800	Droite	23.68	4.9	""	86.1	20
77+900	Axe	23.95	5.7	""	87.1	20.4
78+120	Axe	23.62	4.6	""	85.9	20
78+220	Gauche	23.71	3.7	""	86.2	20.4
78+320	Axe	23.74	4.4	""	86.3	20
78+420	Droite	23.60	4.2	""	85.8	20
78+520	Axe	23.85	4.6	""	86.7	20
78+560	Axe	23.90	5.0	""	86.9	26.5
78+612	Droite	23.60	5.4	""	85.8	27
78+850	Axe	23.58	4.8	""	85.7	27

Les résultats sont concluants. La spécification a été respectée avec un minimum de 85.2% et un maximum de 87.1 %. On pourra donc procéder à la suite des travaux.

III.2.3.4. Couche de roulement (Bicouche)

Notre couche de roulement est constituée de 2 couches de gravillons de dimension différente et d'un liant cut-back 400/600 pour couche d'accrochage du revêtement en enduit superficiel bicouche.

Les granulats sont en provenance de la carrière de Morarano (Granite à biotite) Pk 30+000 dont le coefficient LA est de 41 et la MDE de 18. La première couche est constituée de granulats de la classe 10/14 et la deuxième de la classe 6/10.

- Caractéristiques des matériaux de la couche de roulement (Tableau 24).

Tableau 24: Caractéristiques des matériaux de la couche de roulement

	Première couche	Deuxième couche
Classes Granulaires	10/14	6/10
Coefficient LA	41	41
Coefficient MDE	18	18
Coefficient d'aplatissement	15	15
Liant Hydrocarbonée	Cut-back 400/600	Cut-back 400/600

– Mise en œuvre :

La mise en place de la couche de roulement est très délicate. Elle s'est faite en plusieurs étapes :

- préparation de la surface support : Balayage du support et délimitation de la zone à revêtir ;
- préparation des engins : Fixation de l'ouverture de la trappe du gravillonneur et de la hauteur de la rampe pour la répandeuse à liant ;
- répandage à demi-chaussée du liant (bande gauche puis bande droite) ;
- épandage sur toute la largeur de la chaussée de la première couche de gravillon (Classe 10/14) ;
- une passe au rouleau lisse Changlin et quatre passes pneumatique pour le compactage et l'arrangement des gravillons entre eux ;
- répandage à nouveau du liant à demi-chaussée ;
- épandage du gravillon 6/10 sur toute la largeur de la chaussée ;
- compactage aux pneumatiques jusqu'à ce que les gravillons soient enfoncés bien entre eux.

A la fin de la mise en œuvre des différentes couches et des essais de contrôles, la route est mise en service (Figure 27).

Figure 27: Route bitumée et mise en service à l'entrée du village d'Andranomadio (pK 76+ 500)

III.3. CONCLUSION SUR LE CHAPITRE

L'entretien de l'environnement est l'un des moyens efficaces pour pallier aux problèmes d'ensablement et de formation des lavakas. La protection des versants par la revégétalisation empêche le départ des matériaux par l'érosion ainsi que l'accumulation des sédiments dans les zones de dépressions. Si on associe la revégétalisation à une organisation des écoulements par l'intermédiaire des ouvrages (comme les fossés et les drains), la stabilité des versants est garantie et le cas d'ensablement de moins en moins fréquent.

La mesure des compacités effectuées sur chaque couche de la chaussée a permis de s'assurer, d'une part, d'une bonne performance mécanique de la route et d'autre part, une imperméabilité à l'eau. Une bonne résistance et une insensibilité à l'eau sont les principaux facteurs déterminants dans la durée de vie d'une route. Eloigner l'eau de la chaussée est donc nécessaire pour éviter les désordres qu'ils peuvent créer ; d'où l'importance de construire et d'entretenir les ouvrages d'assainissement de la route. Dans le cas où l'inondation est fréquente, la construction d'ouvrage de franchissement pouvant, à la fois, subir l'action de l'eau et permettre la circulation des biens et des personnes, serait appropriée comme le radier.

CONCLUSION GENERALE

La Commune rurale d'Andaingo, située dans le plateau central de la Grande Ile, se trouve dans un graben allongé Nord-Sud qui s'est formé lors d'un rifting intra-continental qui aurait formé en même temps le bassin de l'Alaotra de direction parallèle à la côte Est et en rapport avec la séparation de Madagascar avec l'Inde. La région est marquée par une forte latéritisation qui met en évidence l'action de l'érosion sur le relief avec l'encaissement du réseau hydrographique qui lui-même est étroitement lié à la tectonique. On constate que la structure du réseau hydrographique dans la zone d'étude semble être contrôlée par la configuration structurale de la région. Une direction Nord Sud avec de nombreux affluents qui s'éparpillent perpendiculairement de part et d'autre du collecteur principal (fleuve Mangoro) témoignant un rift intracontinental

Les différentes études effectuées sur la zone d'étude ont permis de conclure les principaux problèmes rencontrés le long de l'axe. A savoir :

- les dépôts de l'érosion intense des versants qui s'accumulent dans les bas fonds provoquant l'ensablement des rivières et une partie de la route ;
- l'altitude dans certaines parties du bas fond varie de 900 à 920 m d'altitude alors que le grand fleuve sillonne dans les 900 m d'altitude entrainant l'inondation de certain tronçon de la route. Les tronçons qui ne sont pas inondés sont impraticables à cause de la détérioration des matériaux constitutifs de la chaussée sous l'action de l'eau qui s'y accumule ;
- le degré de latéritisation qu'on observe se manifeste par un important recouvrement qui fait la rareté des matériaux rocheux en affleurement pour former les différentes couches de la chaussée.

L'étude du milieu nous a conduit vers une analyse des ressources en matériau pour constituer les couches de la chaussée, d'une part, et d'un côté, à vérifier les performances mécaniques de la plate-forme en vue de fixer l'épaisseur et les spécifications requises pour les sols et roches à utiliser. Cette partie est basée sur la récolte d'échantillons pour des analyses au laboratoire. Pour être utilisable dans la technique de construction routière, les

matériaux doivent satisfaire à des exigences tant mécaniques que physiques. Ces critères sont les suivantes :

- une dimension adaptée à la couche en question (exemple : CB= max 40 mm, CF=max 60 mm) ;
- teneur en eau compatible avec l'exécution des terrassements et du compactage ;
- gonflement faible ;
- cohésion et résistance à la compression élevée ;
- portance et résistance suffisant pour supporter les contraintes répétées dues aux trafics ;
- insensibilité à l'eau.

Pour assurer une circulation pérenne et fluide en tout temps le long de l'axe, compte tenu des problèmes qui s'imposent, des solutions ont été proposées pour chaque cas. La revégétalisation et l'engazonnement des versants en amont constituent des moyens efficaces pour pallier aux problèmes d'ensablement en aval. La maîtrise des venues d'eau en surface (eau de pluie surtout) est aussi une des moyens envisageables pour stabiliser les versants. L'influence du fleuve Mangoro sur la région est sans équivoque. La solution la plus efficace contre l'inondation est la construction d'ouvrages de franchissement et faire face au problème de crue élevée. Les radiers sont ainsi recommandés dans les zones étendues où l'eau envahit une vaste superficie. Dans ce cas même submergé par l'eau, l'ouvrage peut assurer la circulation des véhicules. Les ponts en béton armé et les ponts Bailey sont proposés pour la traversée des rivières où les forces des courants d'eau sont plus fortes. Pour protéger la chaussée de l'eau, la première chose à faire c'est de la rendre insensible à l'eau qui se fait de deux manières, par un bon compactage des différentes couches, par le bitumage approprié pour empêcher l'infiltration d'eau à l'intérieur de la chaussée. Ensuite la réhabilitation ou la construction d'ouvrages de décharge (fossé, dalot, etc.) capables d'évacuer un certain débit d'eau contribue à avoir une route en bonne état et capable d'assurer la circulation pendant toute l'année.

Pour avoir une route circulable et pérenne, le contrôle et curage des ouvrages de décharge doivent être effectués périodiquement et en cas de détérioration, y remédier dans

les brefs délais pour éviter que le cas s'aggrave. Les ouvrages de franchissement doivent aussi faire l'objet d'un contrôle surtout après l'inondation ou le passage des cyclones apportant des fortes précipitations. L'utilisation des engins qui exercent de forte pression sur une petite surface doit être déconseillée pour éviter que la chaussée se rompt et que l'eau s'infiltre et use les matériaux constituants les différentes couches de la chaussée.

Concernant les mesures environnementales pour faire face aux problèmes d'ensablement, il convient de conscientiser les gens sur l'importance de la végétation dans la protection des versants. La combinaison de la revégétalisation avec l'organisation des écoulements est fortement conseillée en plus avec un peu d'imagination et de volonté, l'eau en provenance des versants peut être utilisée pour irriguer les cultures en contre bas.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Arquie, G. et Roude, J., (1979) : Route tome 1, entpe, pp 50 – 75.

[2] BCEOM et CEBTP, (1992) : Les Routes dans les zones tropicales et désertiques Tome 2, Collection routes et villes, pp 265 - 345.

[3] Bésairie, H., (1961) : Etude géologique et prospection au 1/100.000 du Feuille Andaingo-Didy, Rapport annuel du Service géologique pour 1961, pp 39 à 47.

[4] Bourgeat F., (1972) : Sols sur socle ancien à Madagascar, type de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire, ORSTOM, pp 119 – 143.

[5] Chaperon, P. et al, (1992) : Fleuve et Rivière de Madagascar (Ony sy Renirano eto Madagasikara), Edition ORSTOM.

[6] Egisbceom, (2009) : Rapport d'avant Projet détaillé DTE 72115U, Etudes, Gestion, Contrôle et surveillance des travaux de bitumage de la Route Nationale 44 du pk 20 au pk 133, Mars 2009.

[7] GEOSFORCOM, (2010) : Gestion communale gestion communautaire et développement local : vers une cogestion décentralisée des ressources forestiers, suivie environnemental du site d'Andaingo, Avril 2010

[8] Guyot, X., (2004) : Contrôle qualité en construction routière, service qualité colas, pp 4-24, Décembre 2004.

[9] Lautel, R., (1953) : Etude Géologique du socle cristallin de Madagascar à la latitude de Tamatave, Thèse de doctorat d'état, Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, pp 18 – 29, Juin 1953.

[10] Levêque, P., (1983) : Géologie appliquée au génie civil au génie nucléaire et environnement, Edition technique et documentation Lavoisier

[11] Liautaut, G., (1980) : Guide pratique de Dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, pp 57 – 103.

[12] Lisan B., (2010) : Déforestation, Reforestation et protection des forêts, Sciencedaily, pp 40 – 70.

[13] MTPM, (2011) : Travaux d'aménagement de la RN 44 Entre Marovoay et Vohidiala, Réhabilitation des Points critiques avec Bitumage de la Chaussée du Pk 79+000 au Pk 88+000, Dossier 11 DROB 09/4.

[14] MTPM (2010) : Travaux de réhabilitation des points critiques avec bitumage de la chaussée sur la RN 44, Dimensionnement de la chaussée, Dossier 10 DROB 36.

[15] Office National pour l'Environnement, (2009) : Tableau de Bord Environnemental Région Alaotra Mangoro, Edition 2009.

[16] Ohlmacher, G.C., (2000): The Relationship between geology and landslide hazards of Atchison, Kansas, and vicinity. Current Research on Earth Science, 244 (3), 1–16.

[17] Ramasiarinoro, V., (2008) : Tectonique et morphopédologie de la région d'Antananarivo, (centre de Madagascar) - Rhéologie des latérites et mécanismes de formation des lavakas, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo.

ANNEXES

Annexe 1: Classification des sols H.R.B

Classification générale	Au plus 35% des grains plus petits que 80 µ							Plus 35% des grains plus petits que 80 µ				
	A_1		A_3	A_2				A_4	A_5	A_6	A_7	
	A_{1a}	A_{1b}		A_{2-4}	A_{2-5}	A_{2-6}	A_{2-7}				A_{7-5}	A_{7-6}
Pourcentage passant :												
Au tamis de 2 mm.....	≤50											
Au tamis de 0,40 mm...	≤30	≤50	≥51									
Au tamis de 80 µm.....	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	≥36	≥36	≥36	≥36	≥36
Caractéristiques de la fraction passant au tamis de 2 mm :												
– Indice de plasticité	<6		Impossible à déterminer	≤10	≤10	≥11	≥11	≤10	≤10	≥11	≥11	≥11
											$I_P < W_L - 30$	$I_P > W_L - 30$
– Limite de liquidité	Impossible à déterminer		–	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	≥41	≥41
– Indice de groupe	0		0	0		≤4		≤8	≤12	≤16	≤20	≤20
– Appellation générale	Cailloux Graviers Sables		Sable fin	Mélange de graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux				Sols limoneux		Sols argileux		

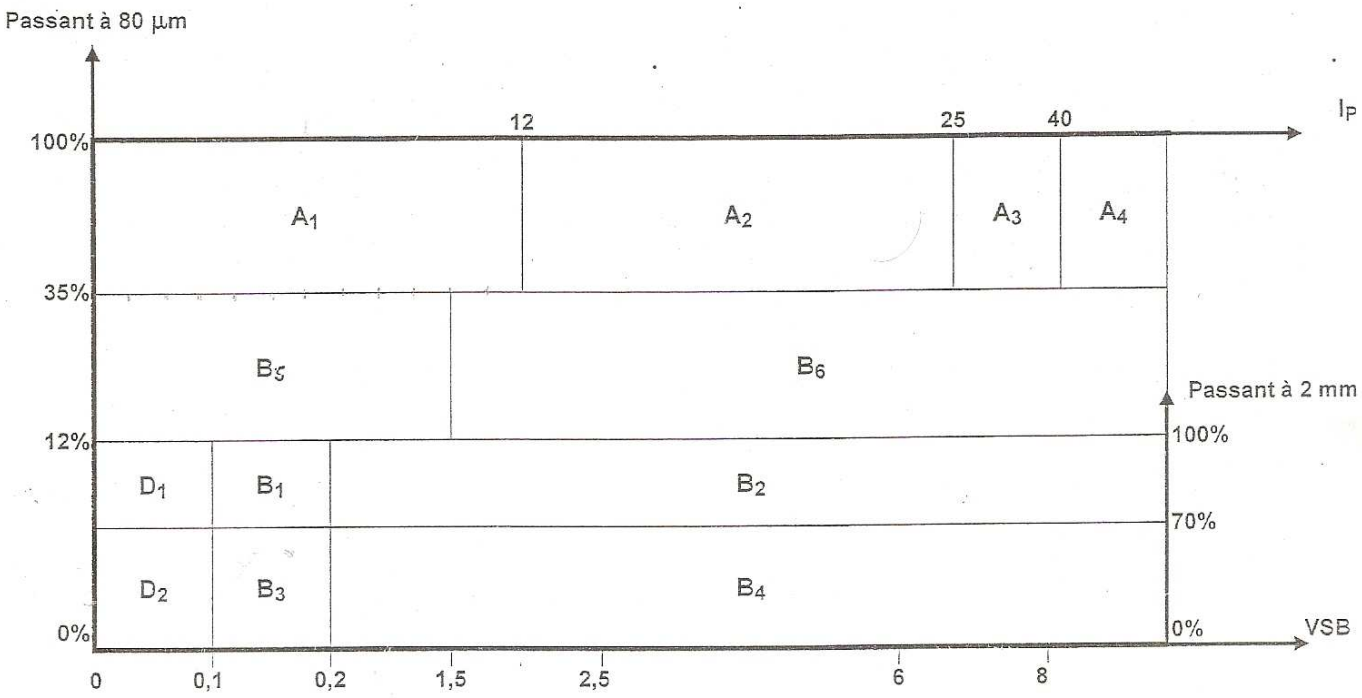
Annexe 2: Classification des sols L.P.C.

				$\alpha = 0{,}73\ (W_L - 20)$						
CLASSIFICATION L.P.C	Plus de 50% des éléments $> 80\mu$ ont un $D > 2$ mm	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	Gb	$I_P < \alpha$	Gb	GL	$I_P < \alpha$	GL	$W_L < 50$ $I_P < \alpha$	Lp
				$I_P > \alpha$	Gb	GA				
		$C_u < 4$ ou $C_c < 1$ ou > 3	Gm	$I_P < \alpha$	Gm	GL	$I_P > \alpha$	GA	$W_L < 50$ $I_P > \alpha$	Ap
				$I_P > \alpha$	Gm	GA				
	Plus de 50% des éléments $> 80\mu$ ont un $D < 2$ mm	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	Sb	$I_P < \alpha$	Sb	SL	$I_P < \alpha$	SL	$W_L > 50$ $I_P < \alpha$	Lt
				$I_P > \alpha$	Sb	SA				
		$C_u < 6$ ou $C_c < 1$ ou > 3	Sm	$I_P < \alpha$	Sm	SL	$I_P > \alpha$	SA	$W_L > 50$ $I_P > \alpha$	At
				$I_P > \alpha$	Sm	SA				
Tamisât à 80μ		0		5		10	12	20	35	50
CLASSIFICATION TERRASSEMENT	$D < 50$ mm	Réfus à 2 mm $< 30\%$	D_1	ES > 35		B_1	$I_P < 10$	B_5	$I_P < 10$	A_1
				ES < 35		B_2			$10 < I_P < 20$	A_2
		Réfus à 2 mm $> 30\%$	D_2	ES > 25		B_3	$I_P > 10$	B_6	$20 < I_P < 50$	A_3
				ES < 25		B_4			$I_P > 50$	A_4
	$D > 50$ mm	$D < 250$ mm	D_3	C_2		C_2 ou C_1 (*)			C_1	
		$D > 250$ mm	D_4	C_3		C_3 ou C_1 (*)				

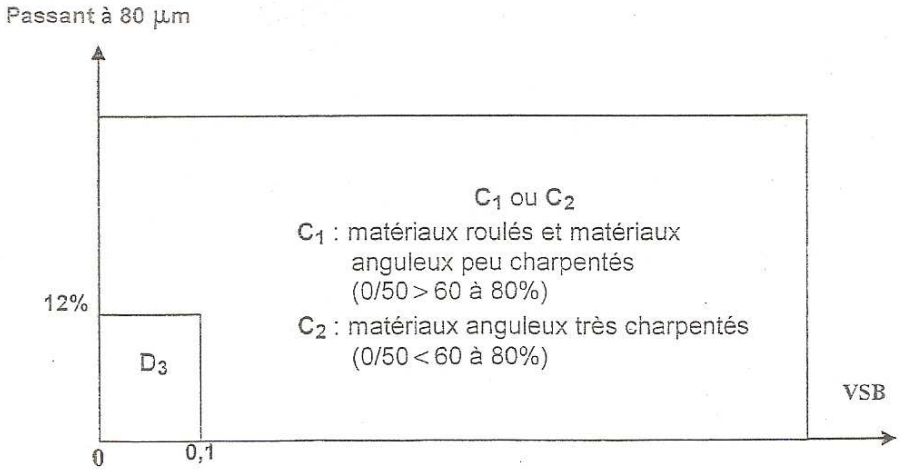
(*) C_2 ou C_1 / C_3 ou C_1 } Selon la granulométrie de la fraction grossière

Annexe 3: Classification des sols G.T.R.

Sols $D_{max} \leq 50$ mm



Sols $D_{max} \geq 50$ mm



Nom : ANDRIAMAMONJISOA
Prénoms : Solofo Nirina
Adresse : Lot II M 97ter Andravoahangy Est 101
e-mail : andriamamonjisoa.iina@yahoo.fr
Tel : (+261) 33 07 780 71
Titre : **Recherche de matériau et choix des moyens de mise en œuvre pour la résolution des problèmes géotechniques de la RN 44, pk 74+500 au pk 88+000, dans la plaine de Mangoro-Ankay, Centre de Madagascar**
Nombre de pages : 88
Nombre de tableaux : 24
Nombre de figures : 27

Résumé

Le présent mémoire se veut dans un premier temps explicite sur l'étude généralisée du site desservi par la Route Nationale 44 dans le cadre du projet de réhabilitation de cette route (du pk 74+500 au pk 88+000). L'objectif est de cerner le site du point de vue géologique, géomorphologique, pédologique, hydrologique et socio-économique afin de déterminer les causes des problèmes sur cet axe et les ressources en matériaux utilisables sur le site en vue d'apporter des recommandations et des propositions de solutions.

Les résultats obtenus à partir des différentes études sont concluants, les causes des problèmes rencontrés sur l'axe sont en grande partie liées à la structure géologique de la région. Une zone de très basse altitude, conséquence de l'évènement tectonique à l'origine de la formation du rift intracontinental, qui est favorable à l'accumulation des débris en provenance des versants. L'inondation est fréquente dans la zone d'étude vue que la route elle-même se trouve à 900 à 920 m d'altitude tandis que le fleuve à 900 m. Les tronçons de la route qui ne sont pas inondés subissent l'action de l'eau. Ce qui provoque une perte de performance mécanique et le départ des matériaux fins qui la constitue rendent de plus en plus difficile la circulation des usagers.

Les données géotechniques au laboratoire ont montré que les argiles rencontrées sont constituées de kaolinite et d'illite dont le gonflement est relativement faible. Aussi, on a constaté un indice de plasticité variant de 15 à 18, caractéristique des sols peu plastiques. Leur abondance dans la zone dépend de la composition chimique de la formation géologique originelle. Les affleurements rocheux utilisés pour la couche d'assise de la route sont rares à cause de l'épaisse couverture latéritique. Les sols et les matériaux meubles présents dans le site pourraient servir de remblais pour rehausser la chaussée dans les zones submersibles.

Les études ont montré qu'il s'avère indispensable de prévoir des solutions qui vont permettre d'améliorer la route et d'assurer une circulation sans interruption le long de l'axe. Il faudra aussi une certaine protection des versants par une revégétalisation suivi d'un réarrangement du sens des écoulements pour la réduction du risque d'ensablement. La construction d'ouvrages tels que les radiers est appropriée à l'entrée du village de Mandrota (au pk 82+200). La mise en place d'ouvrage de franchissement en béton armé ou des ponts en acier pour remplacer les ponceaux en bois assurera la traversée des rivières en période de crue élevée. La route doit aussi faire l'objet d'un contrôle au cours de la mise en œuvre pour assurer que les couches qui la constituent respectent les normes de compactage imposé. Revêtir la route la rend insensible à l'action néfaste de l'eau. Mais cela doit être accompagné de la construction d'ouvrages de décharge et d'assainissement pour diriger l'eau vers un exutoire où il n'aura plus d'influence sur la chaussée.

Mots clés **:** Graben, versant, ensablement, inondation, sol, matériaux, chaussée, géotechnique, Madagascar.

Encadreur: Dr. RAMASIARINORO Voahanginirina J.

Abstract

First of all, the present memoir is to be explicit about the generalized study of the site served by the "Route Nationale 44" within the rehabilitation project of this route (pk 74+500 to 88+000). The target is to surround the geological, geomorphological, pedological, hydrological and socio-economical view point in order to determine the causes of the problems on that line and the material resources that can be used on the spot in order to bring recommendations and solution suggestions.

The results from difficult studies are conclusive. The cause of the problems on the line are mostly linked to the geological structure of the area; a lower altitude zone consequence of the tectonic event due to the formation of the intracontinental rift which is favorable to the fragments accumulation from versants. There is frequent flood in the zone of study as the altitude of road itself 900 to 920 m where as 900 m for the river. The past of the road that are not subjects to the flood undergo the action of the water causing a loss of mechanical performance and the onset of the basic materials make the traffic more and more difficult.

According to the geotechnical instruction in the laboratory we found out two kinds of clays: kaolin and illite; the inflation is low. Also, a plasticity index of the ground from 15 to 18 is shown. Their abundance in the zone depends on the chemical composition of the original geological formation. The rocky outcrops used for the stratum can hardly be found because of the thickness of the laterite cover. The ground and loose materials in the site could be used as embankment to raise the roadway in easily flooded zones.

It turns out to be necessary to present solutions to ameliorate the road and ensure a non-stop traffic along the line. Also, in order to reduce the sandbank risk, one must protect the versants by replanting vegetation followed by rearrangement with the flowing. The construction work, such as foundation rafts is appropriate at the entry of Mandrota village (pk 82+200). The work setting of the reinforced concrete or steel bridges to replace wood culverts will ensure the crossing during the flood. The road should be subject to supervision during the work setting to make sure that the constitutive beds respect the norm of required compacting. Coating the road make it insensate to the bad action of the water. However, it should be followed by the construction work of the discharge and drainage to bring the water to issue where it has no influence on the roadway.

Key words: Graben, versant, sandbank, flood, ground, soil, materials, roadway, geotechnic, Madagascar