



SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Partie 1. CONTEXTE ET ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre 1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre 2. La route

Chapitre 3. La stabilisation

Chapitre 4. Les sols

Chapitre 5. La chaux

Chapitre 6. Sol - chaux

Conclusion partielle

Partie 2. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

Chapitre 1. Prise des échantillons

Chapitre 2. Identification du sol

Chapitre 3. Identification de la chaux

Chapitre 4. Traitement À la chaux

Chapitre 5. Résultats et interprétation des résultats

Conclusion partielle

Partie 3. ÉVALUATION DU PROJET

Chapitre 1. Dimensionnement de la chaussée

Chapitre 2. Comparaison de la stabilisation avec du matériau sélectionné

Chapitre 3. Etude d'impact environnementale

Conclusion partielle

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES

ANNEXES

TABLE DES MATIÈRES



LISTES

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

RN : Route National

CBR: Californian bearing ratio

PK: Point Kilométrique

NF : Norme Française

VBS : Valeur au Bleu du Sol

GTR : Guide des Terrassements Routiers

SETRA : Services d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LNTPB : Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments

HRB : Highway Research Board

LPC : Laboratoire des Ponts et Chaussées

TMJ : Trafic Moyen Journalier

MJA : Moyenne Journalière Annuelle

RRL: Road Research Laboratory

PL : Poids Lourds

MS : Matériau Sélectionné

CG : Côté Gauche

EIE : Étude Impact Environnementale

GES : Gaz à Effet de Serre

MTP : Ministère des Travaux Publics

MTPM : Ministère des Travaux Publics et de la Météorologie

CEBTP : Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics

ESPA : École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

LISTE DES SYMBOLES :

I_p : indice de plasticité

D_{max} : dimension maximale du grain de sol

w_n : teneur en eau naturelle

γ_d : poids volumique sèche

M_h : masse humide

W_L : limite de liquidité

W_p : limite de plasticité

%F : pourcentage des fines

I_c : indice de consistance

γ_s : poids volumique spécifique ou poids volumique réelle

g : pesanteur

γ_h : poids volumique humide

$\gamma_{d_{max}}$: poids volumique sèche à l'optimum Proctor

w_{opt} : teneur en eau optimum ou à l'optimum Proctor

I_p CBR : indice de portance CBR

I_c CBR : indice de compacité CBR

i : taux d'accroissement du trafic

N_e : nombre d'essieux standards

e_{CR} : épaisseur de la couche de roulement

B_c : systèmes de charges conformes aux programmes de charges et épreuves des ponts et routes



LISTE DES FORMULES CHIMIQUES :

CaO : oxyde de calcium

(Ca(OH)₂) : Hydroxyde de calcium

CO₂ : Dioxyde de carbone

CaCO₃ : Carbonate de calcium ou calcaire

H₂O : dioxyde d'hydrogène (eau)

pH : potentiel hydrogène

Na⁺ : ion sodium

K⁺ : ion potassium

Ca⁺⁺ : ion calcium

OH⁻ : ion hydroxyde

ÉLÉMENTS CHIMIQUES :

Na: Sodium

K: Azote

Ca: Calcium

O : Oxygène

C : Carbone

H : Hydrogène



LISTE DES UNITÉS

Km : kilomètre

Km² : kilomètre carré

mm : millimètre

°C : degré Celsius

cm : centimètre

m : mètre

% : pourcent

µm : micron mètre

h : heure

KN : kilo Newton

m³: mètre cube

tr : tour

mn : minute

cm² : centimètre carré

Kgf : kilogramme force

cc: centimètre cube

Ar : Ariary

KN/m³ : kilo Newton par mètre cube

cm³ : centimètre cube

kJ /kg : kilojoule par kilogramme

g : gramme

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Environnement général de la Commune Rural d'Ambondromamy</i>	6
<i>Tableau 2 : Consistance et des caractéristiques du réseau routier de Madagascar.</i>	12
<i>Tableau 3 : Classification des chaux selon l'indice d'hydraulicité</i>	31
<i>Tableau 4 : Types de chaux selon la teneur en CaO de la chaux</i>	31
<i>Tableau 5 : Types de chaux selon la norme NF EN 495</i>	33
<i>Tableau 6 : Quelques applications industrielles de la chaux</i>	34
<i>Tableau 7 : Chaux utilisable pour le traitement des sols</i>	37
<i>Tableau 8 : Composition chimique de l'échantillon de sol</i>	47
<i>Tableau 9 : Valeur des limites d'Atterberg</i>	56
<i>Tableau 10 : Paramètres d'identification de la nature du sol</i>	56
<i>Tableau 11 : Granulométrie de la chaux</i>	73
<i>Tableau 12 : Composition chimique de la chaux</i>	74
<i>Tableau 13 : Densité maximum et teneur en eau optimum pour chaque dosage en chaux</i>	76
<i>Tableau 14 : Résultat de l'essai CBR pour différents dosages en chaux</i>	77
<i>Tableau 15 : Caractéristiques générales de notre sol</i>	78
<i>Tableau 16 : Caractéristiques générales de la chaux</i>	79
<i>Tableau 17 : Résultat des essais de stabilisation à la chaux</i>	81
<i>Tableau 18 : Dosage et paramètre choisi pour une utilisation en couche de base</i>	82
<i>Tableau 19 : Usure annuelle des routes non revêtues.</i>	89
<i>Tableau 20 : Catégories du trafic</i>	90
<i>Tableau 21 : Caractéristiques du gîte</i>	92
<i>Tableau 22 : Comparaison de la technique de mise en œuvre</i>	93
<i>Tableau 23 : Devis quantitatif du sol stabilisé</i>	94
<i>Tableau 24: Coût de la chaux</i>	95
<i>Tableau 25 : Devis quantitatif du matériau sélectionné</i>	95
<i>Tableau 26 : Coût du MS</i>	96

LISTE DES COURBES

<i>Courbe 1 : Éléments majeurs contenus dans le sol</i>	48
<i>Courbe 2 : Courbe granulométrique par tamisage</i>	50
<i>Courbe 3 : Courbe de la limite de liquidité</i>	55
<i>Courbe 4 : Courbe Proctor modifié du sol sans stabilisation.</i>	66
<i>Courbe 5 : Courbe CBR du sol sans stabilisation</i>	72
<i>Courbe 6 : Variation de la courbe Proctor</i>	80
<i>Courbe 7 : Variation de la courbe CBR</i>	80



LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 a : Présentation de la province de Mahajanga et ses districts</i>	4
<i>Figure 1 b : Délimitation de la commune d'Ambondromamy</i>	5
<i>Figure 2 : Profil pédologique de la zone d'étude</i>	7
<i>Figure 3 : Coupe transversale d'une chaussée.</i>	9
<i>Figure 4 : Carte de localisation de la Zone d'Étude</i>	14
<i>Figure 5 : Les différentes phases d'un sol.</i>	21
<i>Figure 6 : Procédure de quartage</i>	46
<i>Figure 7 : Appareil de Casagrande</i>	52
<i>Figure 8 : Moule et dame Proctor</i>	64

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1 : Route poussiéreuse et glissante avec absence de bombement (concave)</i>	15
<i>Photo 2 : Bourbiers</i>	15
<i>Photo 3 : Fossés obstrués</i>	16
<i>Photo 4 : Profil en W</i>	16
<i>Photo 5 : Zone de prélèvement de l'échantillon</i>	45
<i>Photo 6 : Série de tamis normalisée</i>	49
<i>Photo 7 : Appareil de Casagrande</i>	51
<i>Photo 8 : Boîtes de pétris</i>	51
<i>Photo 9 : Plaque de marbre</i>	52
<i>Photo 10 : Décantation du tamisât</i>	53
<i>Photo 11 : Boudin de 3 mm de diamètre et 10 mm de longueur</i>	54
<i>Photo 12 : Détermination de la teneur en eau</i>	54
<i>Photo 13 : Balance de précision</i>	58
<i>Photo 14 : Étuve à température réglable</i>	58
<i>Photo 15 : Pycnomètres</i>	60
<i>Photo 16 : Bain thermostatique</i>	62
<i>Photo 17 : Compactage</i>	68
<i>Photo 18 : Arasement</i>	68
<i>Photo 19 : Presse CBR</i>	69
<i>Photo 20 : Anneaux de surcharge et plateau de gonflement, mise en place du comparateur et imbibition des moules</i>	70
<i>Photo 21 : Tamisage de la chaux</i>	73
<i>Photo 22 : Ajout de la chaux</i>	76
<i>Photo 23 : Pose après malaxage</i>	76



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le réseau routier constitue la veine de l'économie de la nation. La route constitue un facteur de développement économique et social. Vu le coût du transport aérien et l'insuffisance du développement des voies fluviales et des voies ferrées, la route remplira toujours à Madagascar de multiples fonctions. Chaque axe routier aura sa vocation propre : touristique, agricole, minière, administrative, forestière, liaison, industrielle.

Le problème qui se pose dans le domaine routier est que les matériaux de construction routiers s'épuisent petit à petit ou qu'ils représentent des risques considérables pour l'environnement. Ce problème provoque la recherche des nouveaux matériaux ou de matériaux adéquats, plus fiables, plus résistants et même recyclables et durables. La valorisation des substances naturelles et locales est plus particulièrement prisée. Le département Science des Matériaux et Métallurgie se consacre justement dans le domaine de recherche sur les différents matériaux.

Les usagers de la route reliant Ambondromamy au village minier d'Antsakoamaro rencontrent aussi ce même problème, c'est pourquoi la société Malagasy Gypsum, qui possède une exploitation minière aux alentours, s'est portée sur ce sujet.

Notre étude se portera donc sur la stabilisation de la chaussée d'une route à usage minière avec de la chaux locale. Le but général de l'étude est d'essayer de stabiliser le matériau « terre » en place au moyen de la chaux et de prouver l'efficacité de la méthode que ce soit dans le domaine technique, économique, social, ou environnemental.

Pour ce faire, nous allons diviser notre étude en trois grandes parties :

- ➔ premièrement nous allons voir le contexte de l'étude et les études bibliographiques afin de bien comprendre le déroulement de la stabilisation ;
- ➔ ensuite les études expérimentales pour pouvoir observer le comportement des matériaux;
- ➔ et enfin l'évaluation du projet.



PARTIE 1. CONTEXTE ET ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES



Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous présenterons le contexte général de la zone d'étude, les différentes normes et techniques de mises en œuvre de la stabilisation. Nous allons donc voir dans cette partie :

- la présentation de la zone étudiée ;
- la généralité sur les routes ;
- ce qu'est une stabilisation ;
- et enfin les matériaux intervenants c'est-à-dire le sol et la chaux.

CHAPITRE 1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. 1. Localisation de la Commune [1] :

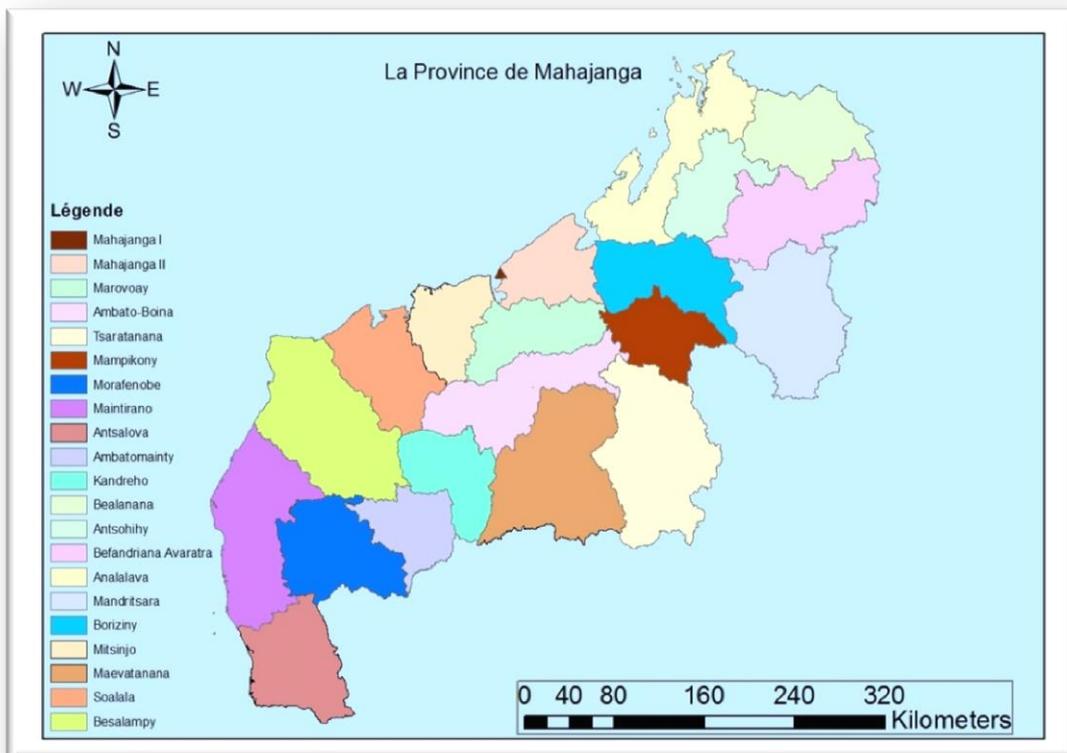
La zone d'étude appartient à la Commune Rurale d'Ambondromamy, Fokontany de Beronono au sein du village d'Antsakoamaro.

La Commune Rurale d'Ambondromamy se trouve dans le District d'Ambato-Boeny, Région de Boeny et Province de Mahajanga. Elle comprend sept (7) Fokontany à savoir : Ambondromamy centre, Mangarivotra, Andavadrere, Andasite-Kamoro, Ambaliha, Beronono, Betaharomahamay.

Avec une superficie de 480Km², elle se situe à une distance de 65Km du Chef-lieu de district sur le carrefour entre la RN4 et la RN6 localisée à 408Km d'Antananarivo.

En outre, elle est délimitée :

- au Nord par la Commune rurale de Manerinerina ;
- au Sud par la Commune rurale d'Anjianjia ;
- à l'Est par la Commune rurale de Sarobaratra ;
- et à l'Ouest par la Commune rurale de Tsaramandroso.



Source : BD 100

Figure 1 a : Présentation de la province de Mahajanga et ses districts

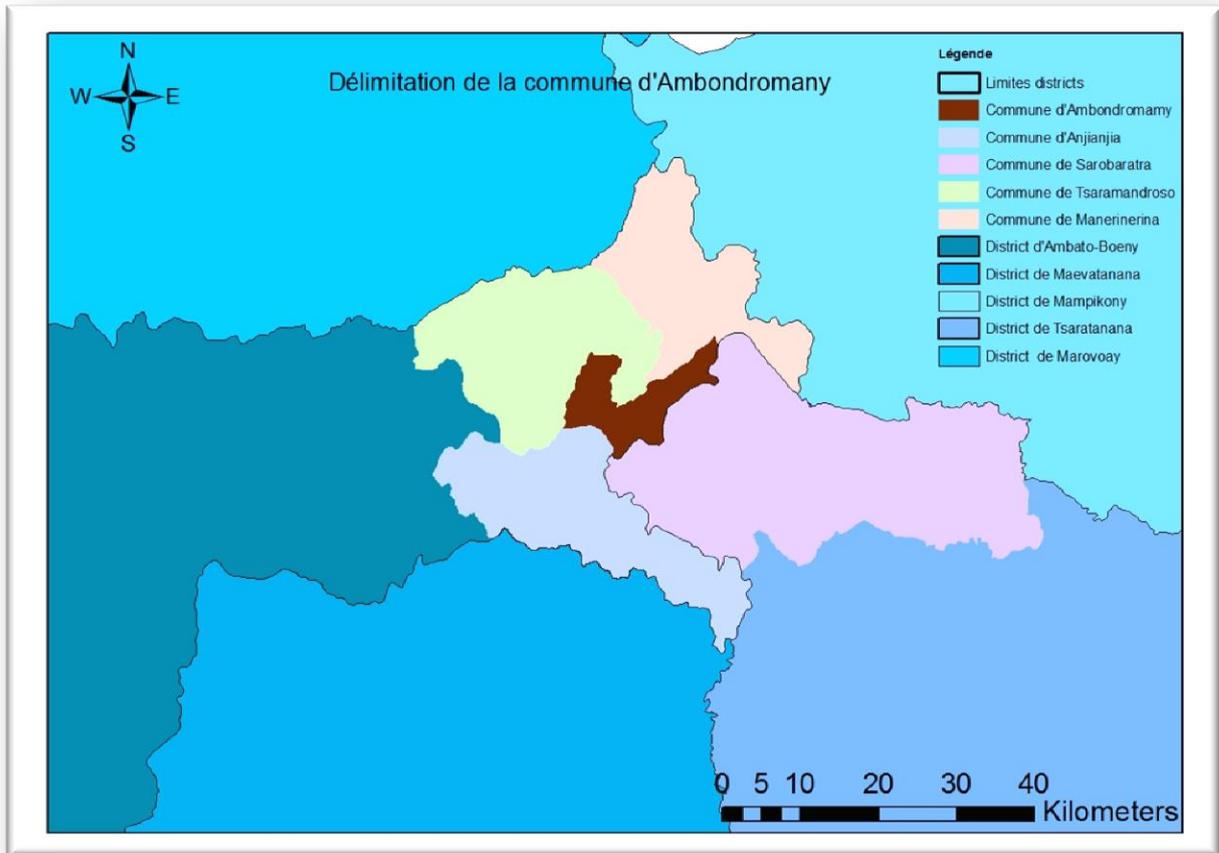


Figure 1 b : Délimitation de la commune d'Ambondromamy

I. 2. Population [2] :

Vu sa position géographique, la population de la Commune d'Ambondromamy est très cosmopolite. On y trouve différentes ethnies telles que les Sakalava, les Merina, les Betsileo, les Antandroy et les Tsimihety, cette dernière prédomine dans la région. La population de la Commune est actuellement estimée à 23 767 habitants (Source : Commune Rurale Ambondromamy).

Signalons que Antsakoamaro est un village nouvellement créé dû à l'existence de l'exploitation de gypse et d'autres exploitations minières dans la zone. Auparavant, ce n'était qu'un campement formé par trois cabanes. Actuellement, la population est estimée à 40 personnes formée essentiellement par les Antandroy.

I. 3. Géographie de la zone [1] [2]:

Les propriétés géographiques de la Commune Rurale d'Ambondromamy sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Environnement général de la Commune Rural d'Ambondromamy

	Description
Hydrographie	Ambondromamy se trouve entre le bassin versant Bemangoraka, d'Anjianjia, et du Maevarano de Tsaramandroso. Elle ne possède pas son propre bassin versant. Par ailleurs, la Commune est alimentée en eau par les plans d'eau dits « Matsabory » et la rivière Mahajamba et Kamoro ainsi que quelques puits.
Pédologie	la présence d'argile marque notre zone d'étude. Différentes couches d'argiles ont été connues dans cette région ; mais en général, les couches géologiques de ce lieu sont formées (<i>Figure 1</i>) : <ul style="list-style-type: none">– d'argile jaunâtre ;– d'argile marneuse ;– d'argile grisâtre ;– de marnes argileuses ;– d'argile noire.
Formations végétales	La végétation est principalement dominée par les forêts de Jujubiers (mokonazy).
Climat	Le climat de la Commune est de type tropical sec, chaud pendant sept mois et cinq mois de saison pluvieuse. Par ailleurs, la région est régulièrement visitée par des cyclones.
Pluviométrie	Il est rythmé par l'alternance d'une saison pluvieuse qui s'étale généralement d'octobre à avril avec une moyenne annuelle de 1000 à 1500 mm d'eau, et d'une saison sèche d'Avril à Octobre.
Température	Pendant l'année, la température varie de 27 à 38°C

Source : PCD Ambondromamy [2].

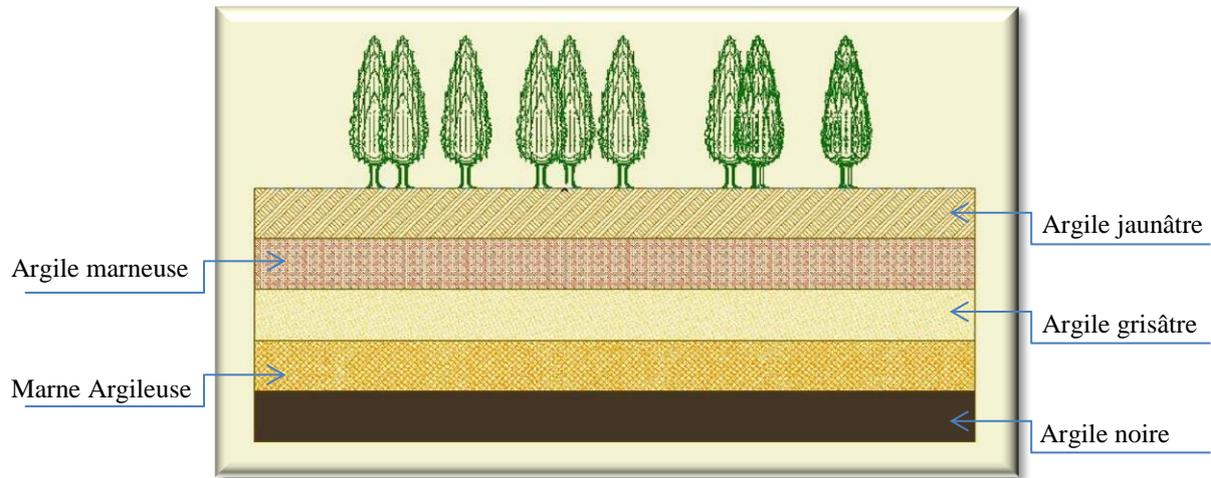


Figure 1 : Profil pédologique de la zone d'étude

I. 4. Économie [1] :

La Commune d'Ambondromamy est caractérisée par une forte proportion de population agissant dans le domaine du secteur tertiaire tel que la restauration et la vente de « voandalana ». À part les cultures vivrières, les cultures industrielles (cane à sucre, arachide, coton, etc...) sont aussi présentes dans la région.

Puisque Antsakoamaro est un village se trouvant dans la forêt, les gens agissent alors sur la fabrication de charbon de bois. Leur production assure la majorité de la consommation en charbon de Mahajanga. Par contre ils pratiquent moins la culture et l'élevage. D'autre part l'extraction de gypse et de pierre décoratifs existe dans le Fokontany.

CHAPITRE 2. LA ROUTE

II. 1. Définition [3] :

Une route est au sens littéral une voie terrestre aménagée pour permettre la circulation de véhicules à roues.

II. 2. Structure [4] :

La structure d'une route est constituée généralement d'une plateforme, d'une couche de forme, des sous-couches, d'une couche de fondation, d'une couche de base et d'une couche de surface (*Figure 2*).

II. 2. 1. La plateforme :

La plateforme constitue l'infrastructure de la chaussée. Elle requiert un traitement tout particulier, puisque la plupart des méthodes de dimensionnement s'appuieront sur la résistance au poinçonnement du sol de plateforme.

Un bon sol de plateforme devrait avoir un indice de portance **CBR supérieur à 5** pour permettre aux engins de chantier de passer, et aussi faire l'objet d'un bon compactage.

II. 2. 2. La couche de forme :

Elle est employée lorsque le terrain naturel présente des caractéristiques particulièrement médiocres et hétérogènes, la couche de forme est constituée de couche de fondation et de couche de base.

II. 2. 2. 1. La couche de fondation :

La couche de fondation assure une diffusion des contraintes afin de les amener à un taux compatible avec la portance de la plateforme.

L'épaisseur minimale de cette couche est généralement de 20 cm. Les matériaux de la couche de fondation doivent être de qualité satisfaisante (Ip **CBR de 30 au minimum**) afin d'assurer sa fonction de diffusion des contraintes. Au cas contraire, elle devra faire l'objet d'un traitement.

II. 2. 2. 2. La couche de base :

La couche de base est soumise à des contraintes plus élevées que dans la couche de fondation.

Cette couche est généralement réalisée avec un matériau grossier (gravier ou pierre concassée), sinon avec d'autres matériaux répondant aux spécifications requises. Ce matériau utilisé doit présenter un indice de portance **CBR supérieur ou égal à 80**.

II. 2. 3. Les sous-couches :

Le rôle de la sous-couche est de constituer, dans certains cas particuliers, soit un écran entre les matériaux mis en œuvre dans les plateformes de terrassements et ceux qui sont employés en couche de fondation (ou en couche de base si la couche de fondation est supprimée), soit un filtre.

II. 2. 4. La couche de surface :

La couche de surface constitue le revêtement de la chaussée. Elle est constituée de :

- ➔ **la couche de roulement**, qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat ;
- ➔ **la couche de liaison** (ou couche d'accrochage), placée entre la couche de base et la couche de roulement.

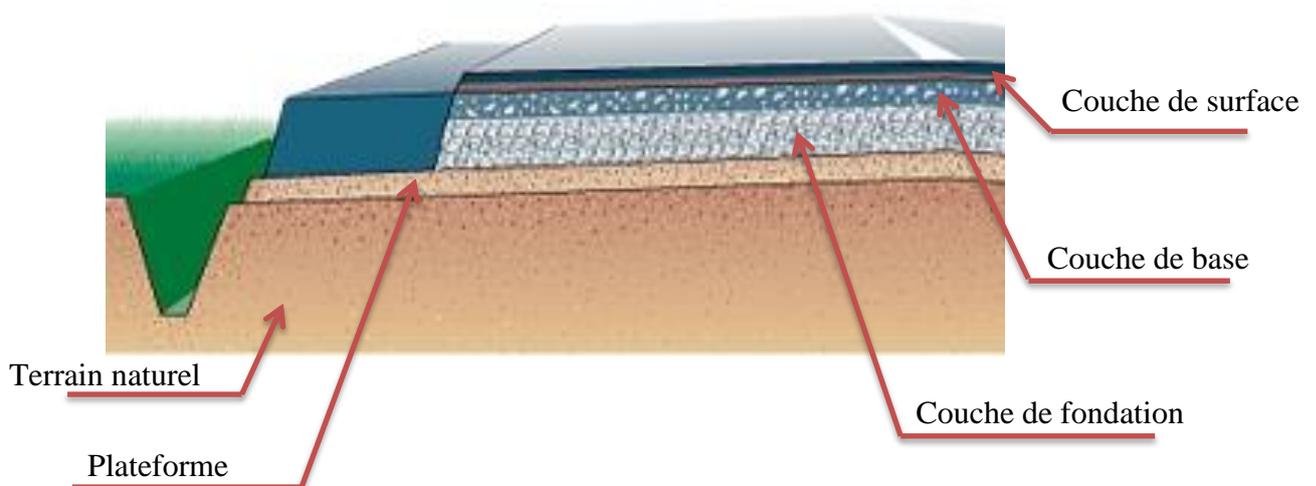


Figure 2 : Coupe transversale d'une chaussée.

II. 3. Catégories [3] [5] [6] [7]:

Il existe 3 types de routes :

- les routes revêtues;
- les chaussées en pavés;
- les routes en terre.

II. 3. 1. Les routes revêtues :

Ce sont des routes dont le trafic dépasse le seuil de Bitumage (> 250 véhicules/jour). Il existe plusieurs types de routes revêtues au point de vue structure :

- les chaussées souples ;
- les chaussées rigides ;
- les chaussées semi-rigides ;
- les chaussées bitumineuses minces ;
- les chaussées à structures mixtes ;
- les chaussées à structure inverse.

II. 3. 2. Les chaussées en pavés :

C'est une chaussée dont la structure n'est ni souple, ni rigide, ni semi-rigide, mais dont la structure est composée d'une couche de sable appelée lit de pose ayant une épaisseur de 5 à 10cm et d'une couche de pavée.

II. 3. 3. Les routes en terres :

Les routes en terre sont des chaussées non revêtues dont le trafic ne dépasse pas le seuil de bitumage. Le matériau de la couche de roulement peut être :

- en graveleux (ou en matériaux sélectionnés MS) ;
- en empierrement par cloutage ;
- en macadam à l'eau ;
- en matériaux stabilisés : les matériaux qui sont sensibles à l'action de l'eau doivent être stabilisés avec un matériaux stabilisant approprié.

Remarque :

Les routes en terre sont en général constituées par une ou plusieurs couches de matériaux. De bas en haut ou au-dessus du terrassement on distingue:

- ★ la couche de forme ;
- ★ la sous-couche ;
- ★ la couche de fondation ;
- ★ la couche de base.

À L'exception de la couche de base, qui est en même temps couche de roulement, les différentes couches jouent le même rôle que dans les chaussées revêtues. Toutefois les routes en terre multicouche sont rares. Le corps de la chaussée est généralement constitué d'une seule couche servant en même temps de couche de base et de fondation. La couche de base ou couche de roulement supporte directement le trafic et n'est pas protégée contre les intempéries.

Pour ces raisons on exige que cette couche ait des caractéristiques mécaniques excellentes et durables, afin de pouvoir supporter longtemps les contraintes élevées de cisaillement et résister à l'usure.

II. 3. 4. Réseau routier de Madagascar :

À Madagascar, on trouve plusieurs classements des routes :

- RNP : Routes Nationales Primaire. C'est le réseau dit « structurant » ;
- RNS : Routes Nationales Secondaires ;
- RNT : Routes Nationales Tertiaires/Temporaires. Les anciennes RIP quand elles relient plusieurs régions ;
- RIP : Routes d'Intérêt Provincial ;
- RIL : Routes d'Intérêt Local. Les anciennes RIP quand elles restent à l'intérieur d'une région ;
- RIC : Route d'Intérêt Communal ;
- RR/PR : Routes Rurales/Piste Rurales, cette appellation semble être une dénomination générique incluant les RNT, RIL et RIC ;
- RNC : Routes Non Classées.

Le tableau suivant est extrait du rapport d'activité 2007 du MTPM, elle résume les routes à Madagascar :

Tableau 2 : Consistance et des caractéristiques du réseau routier de Madagascar.

Classement Routes (charte)	Linéaire Km	Structure chaussées	Linéaire Km	Fonction (destination)	Linéaire Km
Nationales	12 000	Revêtues	5 700	Routes Nationales	11 000
		Non revêtues	6 300		
Régionales (ex provinciales)	18 000	Revêtues	366	Routes et pistes Rurales	27 000
		Non revêtues	17 364		
Communales (et non classées)	8 000	Revêtues	0		
		Non revêtues	8 000		
Total	38 000		38 000		38 000

Source : MPTM.

II. 4. Différentes dégradations des routes en terres [8] [30]:

II. 4. 1. Les tôles ondulées :

Ondulations de faible longueur d'onde et perpendiculaires à l'axe de la chaussée de la forme d'une tôle pour toiture.

Les tôles ondulées sont causées par les actions combinées du vent et de la force tangentielle d'accélération des roues des véhicules.

II. 4. 2. Les ravinements :

Ce sont des incisions linéaires de plus ou moins grandes dimensions, longitudinales ou transversales, que laissent les eaux de ruissellement sur la chaussée et les accotements après leurs passages.

Leur cause principale est le mauvais système d'assainissement qui provoque une érosion de la surface de roulement par les eaux de ruissellement.

II. 4. 3. Les nids-de-poule :

Les nids-de-poule sont des cavités de forme arrondie de faible dimension et de longueur qui se manifeste par l'arrachement localisée des matériaux sur la surface de la couche de roulement.

Causés généralement par la stagnation d'eau sur la chaussée ou le mauvais compactage et la mauvaise qualité de la couche de fondation.

II. 4. 4. L'affaissement :

Il se manifeste par une baisse de niveau apparaissant généralement dans les zones basses. L'affaissement est dû à l'insuffisance de la portance des sols, la présence d'argiles et le congestionnement des ouvrages de franchissement ou d'assainissement.

II. 4. 5. Les ornières :

Les ornières sont des affaissements localisés pouvant affecter entièrement la couche de roulement, sous forme de bandes parallèles à l'axe de la chaussée, creusé par les roues des véhicules.

Ces affaissements localisés sont causés principalement par un mauvais compactage et/ou une insuffisance de la portance du sol support ou du corps de la chaussée par rapport au trafic.

II. 4. 6. Les Profils en W :

Ce sont des affaissements profonds sous forme de bandes parallèles (W) sur les traces de pneus. Sous l'effet du trafic, il se forme de frayées longitudinales dans lesquelles les véhicules sont canalisés.

Ils peuvent être causés par la faible cohésion des matériaux constitutifs de la couche de roulement, l'augmentation du trafic ou encore l'évolution sans Entretien des ornières.

II. 4. 7. Les bourbiers :

Ce sont des dégradations qui se manifestent en saison de pluie par la présence cavité profonde contenant de la boue se situant dans les zones où les eaux superficielles ne sont pas évacuées, mais en période sèche elle se manifeste par la présence de matériaux poussiéreux de forme irrégulière sur la chaussée.

Les bourbiers peuvent être causés par l'insuffisance de portance des sols, l'évolution sans Entretien des dégradations précédentes, le pourcentage élevé des fines des matériaux, l'insuffisance de bombement de la chaussée et le manque d'ouvrage d'assainissement.

II. 5. État de la route étudiée :

II. 5. 1. Historique :

Auparavant, pendant les temps de l'ancien Président Zafy Albert, cette route a été construite pour relier Antananarivo à Mahajanga, mais lorsque la RN4 a été réhabilitée, elle a été

abandonnée et n'a plus été utilisée. C'est pour cela que la route a été surnommée « route Zafy Albert ».

Durant les dernières années, cette route a été utilisée pour des extractions minières et aussi des transports de charbons et de pierres industrielles. Cette route supporte donc de lourdes charges et sollicitations, mais quand même un léger trafic.

Construite plus ou moins au niveau du terrain naturel, elle comporte trois structures entrecoupées : une chaussée bitumineuse mince, une chaussée constituée d'empierrement et une route en terre constituée du sol de terrain naturel. Sur notre tronçon d'étude qui se trouve au **PK 0+000 jusqu'au PK 10+000** (Figure 3) nous retrouvons ces trois différentes structures. Ce qui nous intéresse c'est la route non revêtue qui mesure au total **5,000 Km**. Le type de sol rencontré tout le long du tronçon est généralement le même.



Figure 3 : Carte de localisation de la Zone d'Étude

II. 5. 2. État de dégradation :

Le tronçon revêtu montre un comportement stable tandis que celle de la route non revêtue est quasiment impraticable durant la saison de pluie.

Durant les descentes sur terrains que nous avons effectuées, nous avons surtout remarqué ces dégradations les plus marquantes sur les tronçons non revêtus :

- profil concave (*Photo 1*) ;
- bourbiers (*Photo 2*) ;
- fossés et buses totalement obstruées (*Photo 3*).
- profil en W (*Photo 4*) ;



Photo 1 : Route poussiéreuse et glissante avec absence de bombement (concave)



Photo 2 : Bourbiers



Photo 3 : Fossés obstrués



Photo 4 : Profil en W

II. 5. 3. Comportement de la route :

Pendant la saison sèche, la route est praticable mais est très poussiéreuse et glissante (*Photo 1*) ce qui entraîne un manque de confort et un risque d'accident pour les usagers.

Durant la saison de pluie, la route est quasiment impraticable pour les poids lourds dans les nombreuses zones où sont situés les bourbiers, seuls les véhicules tous terrains comme les 4x4 et les motos cross peuvent y accéder. Il y a aussi une stagnation d'eau dans les zones concaves. Cela entraîne des pertes notables pour les exploitants de la route.



II. 5. 4. Remède :

Ces dégradations relevées sont principalement causées par une insuffisance de portance du sol et par un manque d'assainissement de la route, il serait donc nécessaire d'entretenir cette route en se focalisant principalement sur les causes.

Comme notre étude se porte sur les matériaux, nous allons nous centrer principalement sur la portance du sol c'est-à-dire sur le matériau qui constitue la chaussée.

CHAPITRE 3. LA STABILISATION

III. 1. Définition [9]:

Stabiliser la terre c'est modifier la terre locale pour qu'elle convienne, en mieux, aux exigences c'est-à-dire modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir les propriétés permanentes compatibles avec une application donnée.

III. 2. But [10] [11]:

Le traitement ou stabilisation des sols a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir, à supporter une route, un parking ou une aire industrielle.

Le traitement des sols en place permet d'éviter le décapage et le remplacement par des matériaux d'apport. C'est donc une solution plus économique et bien adaptée à de nombreux chantiers. Elle ne peut intervenir que sur deux caractéristiques de la terre : sa structure et sa texture.

On a trois possibilités d'intervention sur la structure et la texture de la terre :

- réduire les volumes des vides entre les particules, c'est-à-dire agir sur la porosité ;
- colmater les vides qui ne peuvent être supprimés, c'est-à-dire agir sur la perméabilité ;
- améliorer les liens entre les particules, c'est-à-dire, agir sur la résistance mécanique.

III. 3. Types [12]:

Les trois types de stabilisation sont la stabilisation mécanique, la stabilisation physique, et la stabilisation chimique.

III. 3. 1. **Stabilisation mécanique :**

Le principe de la stabilisation mécanique est de modifier les propriétés de la terre en intervenant sur sa structure c'est à dire qu'on modifie la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité généralement par compactage.

III. 3. 2. Stabilisation physique :

Celui-ci consiste à modifier la texture de la terre par traitement thermique par désulfuration ou gel ou par traitement électrique.

III. 3. 3. Stabilisation chimique :

Le principe est d'ajouter d'autres matériaux ou d'autres produits chimiques dans la terre pour en modifier sa propriété. Il existe une réaction physico-chimique entre les constituants actifs de la terre et les matériaux.

Cela entraîne la formation de nouvelles phases au sein de la texture de la terre enrobée à un maximum de grains d'inertes.

III. 4. Les matériaux stabilisants [11]:

Les stabilisants sont des matériaux qui sont souvent des liants permettant l'amélioration des performances physico-mécaniques des sols. Toutefois, le principe de stabilisation peut varier selon le type de stabilisants utilisés.

En général, ces stabilisants sont ceux qu'on utilise avec la stabilisation chimique, et on peut les grouper en deux catégories :

- les stabilisants organiques ;
- les stabilisants minéraux.

III. 4. 1. Les stabilisants organiques :

Ce sont des produits chimiques d'origine organique ayant des caractères chimiques susceptibles de modifier ou d'agir sur celles du matériau à stabiliser. Ils sont souvent des liants hydrocarbonés, mais aussi, certaines substances naturelles ou artificielles d'origine organique peuvent jouer le rôle de stabilisant organique.

III. 4. 2. Les stabilisants minéraux :

Ce sont de produits chimiques d'origine minérale dont leurs propriétés chimiques leur permettent de stabiliser les matériaux. Ils peuvent aussi être appelés liants minéraux. Les plus connus par l'utilisateur sont les ciments, les chaux, les pouzzolanes.



Remarque :

Les stabilisants minéraux sont généralement les plus utilisés, mais plusieurs études se font encore partout dans le monde sur d'autres matériaux qui pourraient être de matériaux stabilisants intéressants.

CHAPITRE 4. LES SOLS

IV. 1. Définitions géotechniques des sols [13] [14] [15]:

1. Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. Le sol est un matériau meuble, ce caractère est fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel, car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous-produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles.

2. Nous schématiserons le sol comme étant composé de quatre phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelées : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse. La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes.

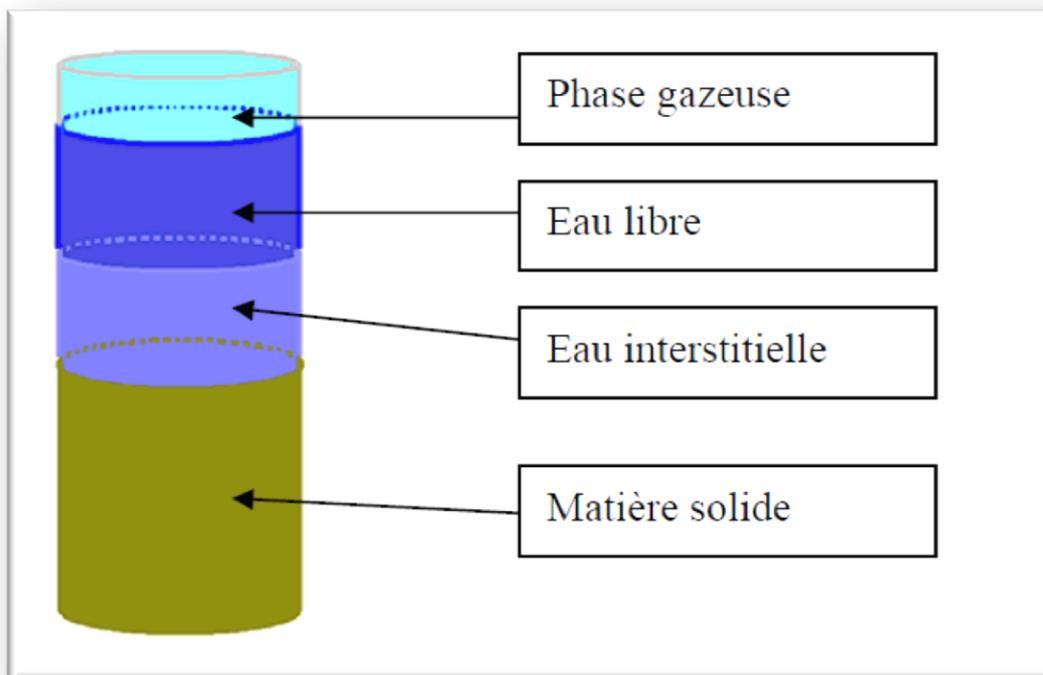


Figure 4 : Les différentes phases d'un sol.

3. Les sols sont des matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables : des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d'origine

géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels, sols organiques, etc.

IV. 2. Types de sols [16] [17]:

On distingue trois grands types de sols :

- les sols grenus ;
- les sols fins, les sols argileux appartiennent à ce type de sol ;
- les sols organiques.

IV. 2. 1. Sols grenus :

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg.

IV. 2. 2. Sols fins :

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg et la granulométrie.

On définit quatre grandes catégories principales:

- les limons très plastiques : Lt ;
- les limons peu plastiques : Lp ;
- les argiles très plastiques : At ;
- les argiles peu plastiques : Ap.

IV. 2. 3. Sols organiques :

Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques :

- matière organique libre : débris végétaux et résidus animaux ;
- matières organique liées : colloïdes humiques fixés à la phase minérale.

La matière organique a un rôle important dans le comportement des sols. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d'eau et est très compressible.

IV. 3. Méthode d'identification générale des sols [7]:

Il existe plusieurs méthodes d'identification et de caractérisation des sols, mais généralement on peut citer :

- la détermination des caractéristiques chimiques et minéralogiques ;
- la détermination des caractéristiques physiques ;
- la détermination des propriétés géotechniques ;
- la détermination du comportement mécanique du sol.

IV. 4. Identification géotechnique ou classification des sols pour l'utilisation en couche de forme [15] :

Nous nous orienterons beaucoup plus dans cette identification, car ce sont les paramètres géotechniques du sol qui nous intéressent le plus.

Selon la norme NF P 11-300, les paramètres retenus se rangent en trois grandes catégories :

- paramètres de nature;
- paramètres de comportement mécanique ;
- paramètre d'état.

Ils sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

IV. 4. 1. Paramètres de nature :

Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité.

IV. 4. 1. 1. La granularité (normes P 94-056 et 057) :

a. Le D_{max} : c'est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

Ce paramètre est déterminant pour préjuger des ateliers de terrassements utilisables et notamment pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires et les conditions de malaxage éventuel avec un liant. C'est également un paramètre important à connaître pour apprécier la représentativité des essais de laboratoire.

➡ *Seuil retenu :*

50 mm : C'est la valeur proposée pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D1 et D2), des sols blocailleux (classes C et D3) (voir classification des sols à l'Annexe N°3) ; c'est aussi une valeur limite couramment admise actuellement pour distinguer les sols pouvant être malaxés intimement avec un liant pour constituer des couches de forme de qualité.

b. *Le tamisât à 80 µm (pourcentage des fines) : ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d'évaluer leur sensibilité à l'eau.*

➡ *Seuils retenus :*

- ★ **35 %** : c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine,
- ★ **12 %** : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

c. *Le tamisât à 2 mm : ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.*

➡ *Seuil retenu :*

- ★ **70 %** : au-delà de 70 % on définit les sols à tendance sableuse et en-deçà de cette valeur, nous avons les sols à tendance graveleuse.

IV. 4. 1. 2. L'argilosité :

a. *L'indice de plasticité I_p (norme P 94-051) :*

C'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction 0/400 µm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

➡ *Seuils retenus :*

- ★ **12** : limite supérieure des sols faiblement argileux ;
- ★ **25** : limite supérieure des sols moyennement argileux ;
- ★ **40** : limite entre les sols argileux et très argileux.

b. La valeur au bleu de méthylène VBS (norme P 94-068) :

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol, mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques années. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

En pratique, on détermine la VBS à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/2mm. La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

 *Seuils retenus :*

- ★ **0,1** : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau. Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisât à 80 µm qui doit être $\leq 12\%$;
- ★ **0,2** : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau ;
- ★ **1,5** : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux ;
- ★ **2,5** : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne ;
- ★ **6** : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux ;
- ★ **8** : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

c. Choix entre I_p et VBS :

L' I_p et la VBS d'un sol étant tous deux des paramètres mesurant l'argilosité, il est utile de préciser les domaines respectifs d'application de chacun d'eux dans l'identification des sols.

Tout d'abord comme la VBS d'un sol est une grandeur qui exprime globalement et selon une échelle quasi linéaire la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le sol étudié, elle est applicable pour l'identification de tous les sols.

Toutefois, l' I_p présente dans le cas des sols moyennement à très argileux quelques avantages sur la VBS. D'abord c'est un paramètre pour lequel on dispose d'une longue expérience dans l'interprétation, ensuite il est plus sensible que la VBS dès que les sols deviennent vraiment argileux, enfin et surtout il s'agit d'un paramètre qui est à la fois un paramètre d'identification, mais aussi de comportement. En effet, l' I_p définit en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine

résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la conception des ouvrages en terre.

IV. 4. 2. Paramètres de comportement mécanique :

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisables dans leurs états naturels sans dispositions particulières.

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : *les coefficients Los Angeles ou LA* (norme P 18-573) et *micro-Déval en présence d'eau ou MDE* (norme P 18-572), ces paramètres s'appliquent aux sols grenus.

➡ Seuils retenus :

- ★ 45 pour les valeurs LA et MDE ;
- ★ 60 pour les valeurs FS (Friabilité du sol).

IV. 4. 3. Paramètres d'état :

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Différents états hydriques considérés :

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique ; son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme. Citons l'état:

- ➡ très humide (th) ;
- ➡ humide (h) ;
- ➡ moyen (m) ;
- ➡ sec (s) ;

→ très sec (ts).

La présente classification a retenu, pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- la position de la teneur en eau naturelle « w_n » de la fraction 0/20 du matériau par rapport à l'optimum Proctor normal « w_{OPN} » exprimée par le rapport : w_n/w_{OPN} (NF P 94-093) ;
- la position de la teneur en eau naturelle « w_n » par rapport aux limites d'Atterberg (w_L et w_P) qui s'exprime par l'Indice de consistance (I_c), (norme P 94-051). L' I_c permet de caractériser correctement les cinq états : th, h, m, s et ts, mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments $\leq 400 \mu\text{m}$;
- l'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle. L'IPI est en général le paramètre à privilégier pour caractériser les états « h » et « th », car il traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. En revanche, il perd sa signification dans les états « s » et « ts ».

IV. 4. 4. Autres paramètres :

Ce sont les paramètres généraux pour l'identification géotechnique d'un sol, mais pour plus de détails et de précisions, il y a aussi les paramètres de portance qui est déterminée par ces deux essais :

- la détermination des caractéristiques de compactage d'un sol par l'essai Proctor normal et Proctor modifié NF P 94-093 ;
- la détermination de l'indice CBR après immersion, l'indice CBR immédiat, et l'indice portant immédiat, mesurés sur échantillon compacté dans le moule CBR NF P 94-078.

CHAPITRE 5. LA CHAUX

V. 1. Définitions [3] [18]:

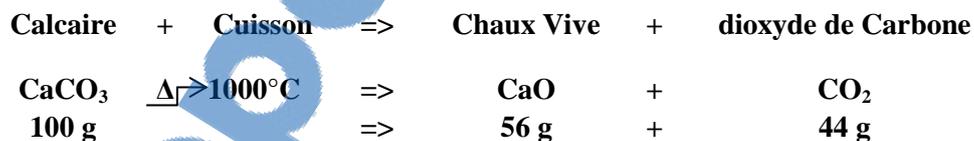
1. La chaux, substance caustique solide, blanche lorsqu'elle est pure. Elle est obtenue par calcination du calcaire et d'autres formes de carbonate de calcium.
2. La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction.
3. La chaux se définit comme la variété physique ou chimique sous laquelle se présente l'oxyde de calcium, soit à l'état d'oxyde plus ou moins pur (CaO), soit sous forme d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) obtenu après hydratation, soit en mélange avec des éléments argileux (chaux hydrauliques).

V. 2. Cycle d'obtention de la chaux [3] [19]:

V. 2. 1. Calcination :

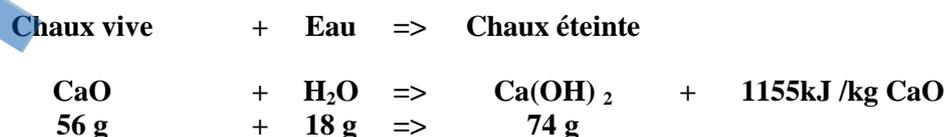
Par calcination du calcaire autour de 1000°C (CaCO_3) on obtient de la chaux vive (Oxyde de Calcium : CaO) et un fort dégagement de dioxyde de carbone (CO_2). **C'est la décarbonatation.**

La réaction s'accompagne d'une perte de masse pouvant aller jusqu'à 45 % et jusqu'à 15 % de son volume, correspondant à la perte en dioxyde de carbone selon la formulation chimique :



V. 2. 2. Extinction :

La transformation de chaux vive en chaux éteinte s'effectue par ajout d'eau (H_2O). Cette opération d'extinction produit l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , avec un fort dégagement de chaleur :



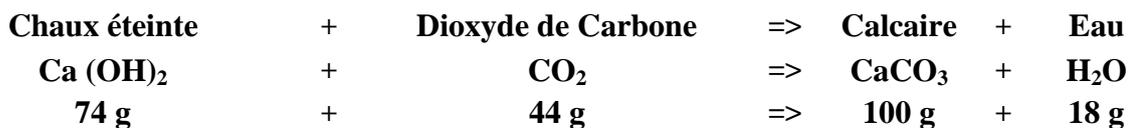
Après transformation, l'augmentation du volume est de près de 30 %.

L'extinction peut être réalisée de différentes manières :

- ➔ arrosage superficiel des blocs de chaux vive, puis terminaison de la réaction à l'air ;
- ➔ immersion des blocs de chaux vive dans un grand volume d'eau puis terminaison de la réaction **à l'air** ;
- ➔ mélange eau-chaux dans un malaxeur avec contrôle de la réaction exothermique (dans l'industrie) ;
- ➔ immersion des blocs de chaux vive dans un grand volume d'eau puis terminaison de la réaction **dans l'eau**.

V. 2. 3. Carbonatation :

La prise de la chaux aérienne s'effectue par carbonatation, c'est-à-dire en absorbant le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'atmosphère : d'où son nom de « chaux aérienne » :



Selon l'humidité du milieu, cette réaction se produit sur plusieurs mois : la vapeur d'eau se lie avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour former l'acide carbonique ; la chaux fixe le dioxyde de carbone contenu dans cet acide et se transforme en calcaire. Le résultat de cette opération est à nouveau du calcaire (CaCO₃).

Le mécanisme de prise par carbonatation s'effectue en présence d'eau, d'où une maîtrise indispensable des conditions de mise en œuvre (humidification des supports, contrôle des conditions climatiques...).

V. 3. Gisement de chaux[20] :

On trouve des gisements de chaux un peu partout dans l'île de Madagascar, mais leur exploitabilité n'a pas encore été bien étudiée.

Donnons quand même quelques gisements qui ont été découverts :

- ➔ du cipolin : dans la province de Tamatave (Ambatosokay, Ambohiboatavo, Antsahamarova Ambatondrazaka) ;
- ➔ du calcaire : dans la province de Tuléar (Andatabo, Soalala, Baie de St Augustin) ;

- ➔ du cipolin : dans la province d'Antananarivo (Ibity Antsirabe, Antelisoratra et Ankadilalana) ;
- ➔ du calcaire : à Antsiranana (Anosirano) ;
- ➔ du calcaire : dans la province de Fianarantsoa (Antsangy de Talata-Ampano) ;
- ➔ du calcaire : à Mahajanga (Amboanio : gisement de 300Km² et de 7 m d'épaisseur).

V. 4. Classification [20]:

V. 4. 1. Selon leurs différentes formes chimiques :

Vous trouverez ci-après, les produits calciques sous leurs différentes formes chimiques :

V. 4. 1. 1. Chaux vive (CaO):

C'est le produit direct de la thermolyse (ou calcination) du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO). Sous cette forme, sa réaction exothermique avec l'eau entraîne un assèchement du sol.

V. 4. 1. 2. Chaux hydratée ou chaux éteinte Ca (OH)₂ :

Elle est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). Sous cette forme, la chaux ne réagit pas avec l'eau et n'a qu'un effet chimique. L'assèchement du sol par adjonction de matière sèche est minime.

V. 4. 1. 3. Calcaire moulu (CaCO₃):

Sous cette forme, le calcaire est livré au secteur agricole. Il n'a qu'un effet chimique ; il corrige la valeur du pH du sol et constitue un apport de matière sèche.

V. 4. 2. Selon son indice d'hydraulicité :

On définit l'indice d'hydraulicité comme l'indice qui évalue les proportions d'éléments argileux qui réagissent avec l'oxyde de calcium à la cuisson.

$$L = \frac{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}}$$

Ces différents oxydes sont déterminés par analyse chimique de la chaux.

Le critère d'hydraulicité permet de différencier les chaux selon le tableau suivant :

Tableau 3 : Classification des chaux selon l'indice d'hydraulicité

Type de chaux	Argile %	L
Chaux grasse	0	0 à 0,10
Faiblement hydraulique	5 à 8	0,10 à 0,16
Moyennement hydraulique	8 à 14	0,16 à 0,30
Hydraulique	14 à 19	0,30 à 0,40
Éminemment hydraulique	19 à 72	0,40 à 0,50

Source : Mémoire de fin d'études DEA O.S. Rabarijoel et H.M. Ratsimbazafy [20].

V. 4. 3. Selon la richesse en carbonate de calcium :

Cette richesse en CaCO_3 , dont dépend la teneur en CaO de la chaux, conduit aux définitions suivantes :

Tableau 4 : Types de chaux selon la teneur en CaO de la chaux

Teneur en CaO (%)	Teneur en Ca(OH)_2	Type
>97	>96	Chaux pratiquement pures
$85 < \text{CaO} < 97$	$85 < \text{Ca(OH)}_2 < 96 \%$	Chaux grasses
$\text{CaO} < 85 \%$	$\text{Ca(OH)}_2 < 85 \%$	Chaux maigres

Source : Mémoire de fin d'études DEA O.S. Rabarijoel et H.M. Ratsimbazafy [20].

V. 4. 4. Selon la norme NF EN 495 :

Entrée en application le 22 mars 2012, la nouvelle norme NF EN 459 « Chaux de construction » clarifie les typologies de ces produits et reprécise les exigences auxquelles ils doivent satisfaire.

Les chaux de construction sont classées en deux familles : la chaux aérienne et la chaux ayant des propriétés hydrauliques.

IV. 4. 4. 1. Chaux aérienne :

Utilisée pour la préparation ou la fabrication de matériaux employés aussi bien dans la construction de bâtiments que pour le génie civil, la chaux aérienne est une chaux qui se combine et durcit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air.

Cette réaction chimique permet à la chaux de contribuer à la durabilité des mortiers en contenant. La chaux aérienne peut se présenter sous différents états granulaires lorsqu'elle est vive (Q) ou sous forme de poudre (S), pâte (S PL) ou coulis/lait de chaux (S ML) lorsqu'elle est hydratée.

En fonction de sa composition, on distinguera la chaux calcique (CL) et la chaux dolomitique (DL). La première est une chaux aérienne principalement constituée d'oxyde de calcium et/ou d'hydroxyde de calcium tandis que la chaux dolomitique est une chaux aérienne principalement constituée d'oxyde de calcium magnésium et/ou d'hydroxyde de calcium magnésium.

IV. 4. 4. 2. Chaux ayant des propriétés hydrauliques :

Ce type de chaux est constitué principalement d'hydroxyde de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium. Ils ont la propriété de **faire prise et de durcir lorsqu'ils sont mélangés à de l'eau, puis suite à la réaction avec le dioxyde de carbone de l'air.**

En fonction de leur composition, on distinguera trois sous-familles de chaux à propriétés hydrauliques :

- ➔ la chaux hydraulique naturelle (NHL), produite par la calcination de calcaires plus ou moins argileux ou siliceux avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage ;
- ➔ la chaux formulée (FL), constituée principalement de chaux aérienne et/ou de chaux hydraulique naturelle avec des matériaux hydrauliques et/ou pouzzolanique ajoutés ;
- ➔ la chaux hydraulique (HL), constituée de chaux et d'autres matériaux tels que le ciment, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, le filler calcaire, etc.

Leur dénomination est faite en fonction de leur teneur en $\text{CaO} + \text{MgO}$ pour la chaux aérienne, et aussi en fonction de sa résistance à la compression pour la chaux hydraulique.

Ces différents types de chaux sont résumés dans le *Tableau 5* de la page suivante.

Tableau 5 : Types de chaux selon la norme NF EN 495

		TYPES DE CHAUX	
		Désignation	Notation
Chaux aérienne	Chaux calcique (CL)	Chaux calcique 90	CL 90
		Chaux calcique 80	CL 80
		Chaux calcique 70	CL 70
	Chaux dolomitique (DL)	Chaux dolomitique 90-30	DL 90-30
		Chaux dolomitique 90-5	DL 90-5
		Chaux dolomitique 85-30	DL 85-30
Chaux dolomitique 80-5		DL 80-5	
Chaux hydraulique	Chaux hydraulique naturelle (NHL)	Chaux hydraulique naturelle 2	NHL 2
		Chaux hydraulique naturelle 3,5	NHL 3,5
		Chaux hydraulique naturelle 5	NHL 5
	Chaux formulée (FL)	Chaux formulée A 2	FL A 2
		Chaux formulée A 3,5	FL A 3,5
		Chaux formulée A 5	FL A 5
		Chaux formulée B 2	FL B 2
		Chaux formulée B 3,5	FL B 3,5
		Chaux formulée B 5	FL B 5
		Chaux formulée C 2	FL C 2
		Chaux formulée C 3,5	FL C 3,5
		Chaux formulée C 5	FL C 5
		Chaux hydraulique (HL)	Chaux hydraulique 2
Chaux hydraulique 3,5	HL 3,5		
Chaux hydraulique 5	HL 5		

Source : NF EN 459.

V. 5. Utilisation [10] [21] [22]:

La chaux est produite dans des unités de production industrielle ou artisanale pour de multiples usages, allant de la sidérurgie aux applications environnementales, en passant par l’agriculture, la construction et le génie civil. À chaque application correspond un type de production de chaux répondant à des exigences spécifiques.

La chaux agricole aura, par exemple, une valeur de neutralisation donnée et sa solubilité sera déterminée par sa finesse. En raison de ces caractéristiques, ce type de chaux ne sera pas recommandé en sidérurgie par exemple.

La chaux utilisée pour la production de béton cellulaire se caractérise par une évolution de température d’extinction très spécifique, mais se révélera peu efficace pour le traitement des sols.

La chaux intervient aussi à différents stades du traitement des sols. La qualité de la chaux utilisée aura une influence directe sur l’efficacité du traitement des sols.

Bref, elle entre dans un grand nombre d’utilisations, depuis des applications artisanales jusqu’à des processus industriels très évolués. Le *Tableau 6* résume les utilisations de la chaux.

Tableau 6 : *Quelques applications industrielles de la chaux*

Secteurs d'applications	utilisation
Environnement – gaz	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation des polluants présents dans les gaz résiduaires comme le soufre et le chlore ; • mélangée à des additifs, elle capture les métaux lourds.
Environnement – eau	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des effluents – traitement des eaux usées industriels et minières (ajustement du pH, élimination du phosphore et de l'azote, et clarification de l'eau) ; • adoucissement et élimination des impuretés de l'eau potable ; • traitement des eaux usées.
Environnement-déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des déchets médicaux et dangereux ; • traitement des boues organiques et inorganiques.
Environnement – sols contaminés	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustement du pH et immobilisation des sulfates, des phosphates et des métaux lourds.
Construction et Génie Civil	<ul style="list-style-type: none"> • Production de briques et de blocs de béton cellulaire ; • maçonnerie et enduits de façades ; • stabilisation des sols et liants routiers à la chaux.
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des sols – ajustement du pH des sols pour atteindre des conditions optimales de croissance et améliorer ainsi le rendement des cultures.
Aciers et métaux non-ferreux	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation dans les procédés de fabrications de l'acier pour réduire les teneurs en soufre et en phosphore, modifier la viscosité du laitier, protéger les éléments réfractaires et former le laitier ; • utilisation en tant que fondant dans la fusion des minerais de cuivre, de plomb, de zinc et d'autres métaux ; • neutralisation et enrobage des câbles électriques après leur nettoyage à l'acide.
Industrie chimique et papeterie	<ul style="list-style-type: none"> • Papier – processus de fabrication ; pulpe et matière première pour le carbonate de calcium précipité ; • huile d'addition pour les lubrifiants ; • matières plastiques – utilisée en tant que desséchant dans la fabrication de produits pétrochimiques ; • tannage des cuirs ; • industries du verre et de la soude ; • neutralisation des acides.
Produits pharmaceutiques, soins à la personne et produits alimentaires	<ul style="list-style-type: none"> • Composition de la matrice de médicaments ; • fabrication du phosphate de calcium, un additif pour pâte dentifrice ; • fabrication d'additifs pour les aliments et les boissons ; • industrie du sucre afin de précipiter les impuretés et extraits de betterave et de canne à sucre et neutraliser également les odeurs générées par le lavage et le transport de betteraves.

Source : *Techniques et pratiques de la chaux, École d'Avignon [21].*

CHAPITRE 6. SOL - CHAUX

VI. 1. Action de la chaux sur le sol [10] [11] [23] [24] :

La chaux agit sur les sols argileux par une action chimique qui modifie leurs propriétés géotechniques. Le traitement à la chaux des sols trop humides et/ou trop plastiques, tels que les sols argileux ou limoneux, est une solution souvent préconisée pour stabiliser les sols et rendre les terrassements réalisables, il suffit que le sol soit apte au traitement.

Lors du traitement de ceux-ci à la chaux deux réactions différentes se produisent : une modification immédiate et une modification à long terme.

VI. 1. 1. **Modification immédiate :**

➔ La chaux réagit sur l'argile par échange ionique entre les cations Na^+ et K^+ existant dans l'argile et les cations Ca^{++} d'apport, et par floculation des particules argileuses, provoquée par les forces électriques mises en jeu par l'apport d'ions Ca^{++} et OH^- ;

➔ Les modifications géotechniques :

- augmentation de la limite de plasticité ;
- l'indice de plasticité I_p diminue ;
- la densité maximum à l'optimum Proctor γ_d diminue ;
- la teneur en eau à l'optimum Proctor augmente ;
- la sensibilité à l'eau diminue (la courbe Proctor s'aplatit) ;
- le gonflement diminue ;
- l'indice CBR augmente ;
- la perméabilité diminue.

Ces modifications apparaissent pour des dosages en chaux très faibles, de l'ordre de 0,5 % à 1,5 % en laboratoire, suivant le sol traité.

VI. 1. 2. **Modification à long terme :**

Les phénomènes de prise et de durcissement de la chaux sont du même type que ceux du ciment. Cette action lente est susceptible de se développer sur plusieurs années. Elle a pour effet de faire évoluer encore favorablement les propriétés géotechniques et particulièrement la résistance à la compression simple, l'indice CBR et la stabilité à l'immersion.

Grossièrement, dans les conditions atmosphériques favorables (hygrométrie, température, vent), l'apport de 1 % de chaux vive fait diminuer la teneur en eau de 1 %, mais pour la chaux éteinte cette variation de la teneur en eau est moindre car il n'y a pas de réaction de recarbonatation, mais seulement un apport de matériau sec.

VI. 2. Les critères de choix de la chaux [25]:

On peut utiliser soit de la chaux vive soit de la chaux éteinte. La chaux vive pose des problèmes de sécurité lors des différentes manipulations (transport et mise en œuvre) ; en revanche, elle présente plusieurs avantages sur la chaux éteinte :

- ➔ l'abaissement de teneur en eau obtenu est supérieur ;
- ➔ à poids égal, elle est plus efficace car elle fournit plus d'ions Ca^{++} (3 % de chaux vive ont les mêmes effets que 4 % de chaux éteinte) ;
- ➔ la chaux vive est plus dense que la chaux éteinte.

Les critères d'efficacité de la chaux sont de deux catégories : granulométrique et chimique. Ils sont choisis pour faciliter la dispersion de la chaux dans le sol et pour obtenir une réaction intense grâce à la granulométrie, à la réactivité et à la teneur en chaux libre.

VI. 3. Aptitude d'un sol au traitement à la chaux [24] [26]:

VI. 3. 1. Paramètres de stabilisation :

Le mode d'action de la chaux fait que la qualité intrinsèque d'un sol-chaux dépend de beaucoup de facteurs, liés principalement aux caractéristiques des matériaux constitutifs et à la qualité du traitement :

- ➔ matériaux : sol à traiter, chaux, dosage en chaux ;
- ➔ traitement : pulvérisation, malaxage, teneur en eau, compactage, cure.

D'autre part, les qualités minimales à obtenir dépendent de l'utilisation projetée.

VI. 3. 1. 1. Matériau à traiter :

L'éventail des sols passibles d'un traitement à la chaux en vue d'obtenir ces qualités, du moins à moyen terme, est large. Mais il est évident qu'ils doivent contenir une phase argileuse non négligeable, puisque c'est à partir d'elle que se fera l'amélioration des caractéristiques par réaction avec de la chaux.

Il n'est pratiquement pas possible de préciser beaucoup plus une spécification sur le sol car cela dépend beaucoup de sa réactivité avec la chaux. Une étude en laboratoire est nécessaire afin de connaître l'ordre de grandeur de l'amélioration obtenue et le dosage optimal.

VI. 3. 1. 2. La chaux :

Les critères de la chaux sont de deux types : granulométrique et chimique.

- ➔ L'action de la chaux est d'autant plus forte que sa dispersion dans le sol et sa surface d'attaque seront grandes, ces deux critères ne pourront être obtenus qu'avec des éléments aussi fins que possible, les critères correspondants sont la granulométrie passant au tamis de 80 μm et 0,2 mm.
- ➔ La réactivité de la chaux dépend de la qualité de chaux active qu'elle contient.

Les spécifications relatives aux chaux utilisables pour le traitement des sols sont les suivantes :

Tableau 7 : Chaux utilisable pour le traitement des sols

	Critères granulométriques	Critères chimiques et de réactivité
Chaux vive	<ul style="list-style-type: none">- classe granulométrique 0/2mm- passant au tamis 200 μm >90 %- passant au tamis de 80 μm > 50 %	<ul style="list-style-type: none">- Teneur en CaO > 80 %- teneur en chaux éteinte < 5 %- test de réactivité à l'eau <25mn
Chaux éteinte	Passant au tamis de 80 μm >90 %	Teneur en CaO > 50 %

Source : Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux [24].

VI. 3. 1. 3. Dosage :

Le dosage optimal pour un traitement à la chaux dépend bien entendu du sol et de la chaux utilisée, ainsi que de la qualité désirée du mélange :

- ➔ Ce dosage est exprimé en % en poids de sol sec pour une quantité de chaux déterminée ;
- ➔ Il n'est pas obligatoire pour des raisons d'économie, surtout en couche de fondation, d'utiliser le dosage optimal, dès lors qu'un dosage inférieur permet d'obtenir des résultats suffisants.

VI. 3. 1. 4. Spécifications [24] [27]:

Pour fixer des spécifications, les problèmes de choix des sols à traiter, de la chaux et du dosage à utiliser, sont étroitement liés et interfèrent entre eux. Ce n'est qu'une étude en laboratoire qui permettra de trouver les compromis économiques et techniques optimales en fonction des possibilités et des impératifs. Une prédiction exacte de la quantité de chaux requise ne peut être formulée sur la base d'hypothèses. Quant à la teneur en eau initiale, elle dépend des circonstances atmosphériques au moment de l'exécution de la stabilisation.

VI. 3. 2. Les études préalables (selon les recommandations du SETRA et du LCPC) [26] :

Une étude de reconnaissance préalable est nécessaire pour savoir si le sol est apte au traitement à la chaux ou non. Le but de l'étude en laboratoire est de rechercher quels sont les dosages en chaux à prévoir en fonction de la chaux utilisée, de la nature et de l'état des sols visés par le traitement, et de l'utilisation soit en remblai, soit en couche de forme du matériau traité.

Cette étude doit comporter :

VI. 3. 2. 1. Le classement des sols en familles :

En donnant les caractéristiques suivantes : caractéristiques selon la norme NF P 11-300, courbe Proctor, courbe CBR.

VI. 3. 2. 2. L'identification de la chaux :

L'étude en laboratoire doit, dans toute la mesure du possible, être réalisée avec la chaux qui sera utilisée sur le chantier. L'identification de la chaux comporte la granulométrie par tamisage, la mesure de la teneur en chaux libre, la teneur en chaux vive (éventuellement) et le test de réactivité (pour les chaux vives) selon la norme NF EN 459-1 et 2.

VI. 3. 2. 3. L'étude du traitement proprement dit (dosage et aptitude):

Cette étude doit être réalisée pour chaque type de sols et pour chaque chaux, si plusieurs chaux de caractéristiques différentes sont en concurrence. Elle est conduite différemment suivant l'utilisation du matériau traité, en remblai ou en couche de forme.

VI. 3. 2. 4. Cas de l'utilisation en couche de forme :

La qualité demandée peut, dans ce cas, également s'exprimer par un indice CBR, mais déterminé après immersion. L'indice CBR à retenir doit être choisi en fonction :

- ➔ des éléments qui permettent de définir les caractéristiques utiles d'une couche de forme, à citer:
 - la qualité globale prévisible du terrassement,
 - la qualité demandée par la chaussée
 - notamment, la couche de fondation,
 - et les sollicitations prévisibles de la couche de forme.
- ➔ du bilan épaisseur-qualité du matériau traité en fonction du dosage, ce qui fait intervenir le compactage qui doit pouvoir être d'autant plus intense que le dosage est élevé.

VI. 4. Mécanisme de stabilisation à la chaux [11] [24]:

VI. 4. 1.Principe :

La stabilisation à la chaux consiste en une incorporation de chaux vive ou éteinte au matériau à traiter. L'action de la chaux concerne les particules argileuses contenues dans le sol.

VI. 4. 2.Mise en œuvre :

Le traitement des sols à la chaux comprend les opérations de stockage, épandage, suivi ou éventuellement précédé d'une scarification du sol, de malaxage, de compactage, de cure et éventuellement de revêtement.

VI. 4. 2. 1. Stockage de la chaux :

Sauf cas exceptionnel où le rythme de production peut être adapté et suivre exactement le rythme du chantier, il est nécessaire de stocker la chaux afin d'éviter les ruptures d'apport qui risquent d'arrêter le chantier.

Les principaux stockages possibles sont le stockage en sacs et le stockage en vrac ou en silos. Ils dépendent bien entendu de l'éloignement du lieu de fabrication mais ils doivent être effectués de manière à préserver au maximum la chaux de l'air et de l'humidité.

VI. 4. 2. 2. Épandage :

Les modes de stockage sont conditionnés également par les modes d'épandage utilisés. Il existe trois types principaux : l'épandage manuel, mécanique et par coulis.

a. *Épandage manuel :*

Les sacs de chaux sont répartis sur la surface à traiter, ouverts et vidés en place, la chaux est alors répartie en couche uniforme à l'aide de raclettes.

b. *Épandage mécanique :*

Ce type d'épandage s'effectue sur des plateformes bien réglées.

c. *Épandage par coulis :*

L'épandage par coulis consiste à préparer à l'avance un mélange eau + chaux convenablement dosé et malaxé, et à le répandre sur la couche à traiter.

VI. 4. 2. 3. **Malaxage :**

L'opération de malaxage comprend les opérations de :

- ➔ préparation du terrain qui précède en réalité l'épandage et est importante, car une fois le malaxage terminé, il faut que la surface ait un bon fini ;
- ➔ scarification éventuelle, cette opération augmente le rendement du malaxeur, et permet d'augmenter l'épaisseur du traitement. Elle s'effectue avec le ripper ;
- ➔ arrosage ou aération du mélange sol-chaux selon la teneur en eau optimum voulue ;
- ➔ malaxage qui consiste à mélanger le matériau d'une façon homogène. Les engins existants sont les suivants :
 - charrue à disque (à éviter surtout en couche de base) ;
 - malaxeur à rotor ;
 - train de stabilisation.

VI. 4. 2. 4. **Compactage :**

Le compactage du sol-chaux est en général plus facile que celui du sol non traité.

Les engins à utiliser sont les mêmes que ceux adaptés aux sols fins, ce sont :

- ➔ les compacteurs à pieds-de-mouton ;
- ➔ les compacteurs à pneus lourds ;
- ➔ les rouleaux lisses vibrants.

Le compactage comporte le réglage qui consiste à mettre en œuvre une légère pente pour assurer le bombement de la chaussée. Il faut assurer en même temps le compactage et le lissage de la surface, ce qui est bien réalisé par les rouleaux lisses vibrants.



CONCLUSION PARTIELLE

Nous avons pu voir dans ce chapitre les généralités sur les routes et que la mauvaise portance du matériau de construction de la route, ce qui est le cas de la route que nous étudions, est défavorable pour celle-ci.

Certains sols, limoneux ou argileux, en raison de leurs propriétés géotechniques intrinsèques et (ou) de leur teneur en eau sont considérés comme des matériaux mauvais ou médiocres, créant un handicap économique et technique. Le plus souvent, ces sols sont mis en dépôt et remplacés par d'autres matériaux de meilleure qualité.

Le traitement du sol en place peut apporter une solution aux problèmes posés par ces sols, à la fois en modifiant leur nature et en améliorant leur état. Il permet d'utiliser des sols impropres au réemploi ou de qualité médiocre dans leur état naturel.

Mais il n'existe pas une formule toute faite pour ou un dosage précis car chaque sol a ses propriétés, seule une étude en laboratoire permet de déterminer la nature exacte du sol, de la chaux, l'aptitude au traitement du matériau et enfin le dosage en liant.

Nous allons donc étudier le comportement de notre sol en laboratoire dans la partie qui suit.



PARTIE 2. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES



La qualité d'un sol-chaux dépend de la nature des matériaux, du dosage et de la mise en œuvre du traitement. Nous avons effectué des essais au laboratoire afin d'étudier chaque matériau, c'est-à-dire le sol et la chaux afin de déterminer si la stabilisation de sol à la chaux peut être techniquement adaptée sur notre chaussée, et de déterminer le dosage en chaux optimum à mettre en œuvre pour éviter un surdosage ou un manque de dosage. Pour cela nous allons voir:

- tout d'abord la prise des échantillons ;
- ensuite le classement des sols ;
- puis l'identification de la chaux ;
- le traitement à la chaux ;
- enfin le résultat des essais et l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 1. PRISE DES ÉCHANTILLONS

I. 1. Sol :

I. 1. 1. **Prise in-situ :**

I. 1. 1. 1. **Échantillonnage et techniques de prélèvement :**

L'échantillonnage pour l'essai géotechnique doit être réalisé de manière à représenter au mieux l'ensemble de la route étudiée. Le matériau fourni doit provenir d'une zone homogène ou d'un mélange bien caractérisé.

La quantité à prélever est de quatre à huit fois la quantité nécessaire aux analyses. Sur l'échantillon prélevé, un quartage est réalisé suivant la technique standard, de manière à pouvoir fournir au laboratoire la quantité nécessaire, en fonction des essais à réaliser.

Le prélèvement doit se faire selon les règles habituelles : précautions pour ne pas y mélanger des éléments étrangers, conditionnement suffisant pour préserver la teneur en eau naturelle.

I. 1. 1. 2. **Prélèvement de notre échantillon :**

Pour pouvoir représenter au mieux notre étude, nous avons choisi le cas le plus défavorable, c'est-à-dire la partie la plus instable de la route.

Notre prélèvement a été effectué dans un point noir (*Photo 5*) en suivant les prescriptions décrites précédemment pendant la saison sèche (mois d'Août).

Comme c'est la couche de roulement qui nous intéresse, nous avons effectué l'échantillonnage à l'épaisseur de la couche de roulement, c'est-à-dire à une profondeur de 30 cm. Le prélèvement d'échantillon remanié est pratiqué à la pelle. Le sol prélevé est soigneusement mis dans un sac de jute et bien fermé pour conserver les matériaux fins et sa teneur en eau.



Photo 5 : Zone de prélèvement de l'échantillon

I. 1. 2. Préparation de l'échantillon : méthode de quartage [28] :

I. 1. 2. 1. But :

Prélever une fraction d'un matériau tel que la partie prélevée soit représentative de l'ensemble de l'échantillon, et/ou que la partie prélevée soit identique à la partie restante.

I. 1. 2. 2. Principe :

Le quartage consiste à échantillonner à sec le matériau pour disperser les éléments fins qui sont, le plus souvent, soit perdus sous forme de poussières, soit mal répartis au cours du fractionnement.

I. 1. 2. 3. Quartage par méthode du cône :

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que très peu de matériel. La *Figure 5* illustre la procédure qui consiste à :

- verser l'échantillon en un cône régulier sur une surface propre à l'aide d'une petite pelle ;
- séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres ;

- scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cônes identiques ;
- prélever et rassembler les quarts 2 et 4 (*Figure 5*) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée pour chaque essai.

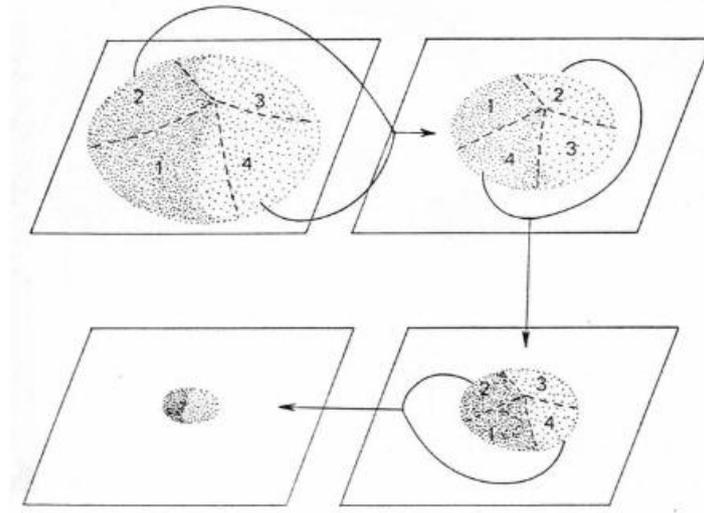


Figure 5 : Procédure de quartage

I. 2. Chaux :

L'échantillon de chaux à prélever doit être celui qui va être utilisé pour la stabilisation. Nous avons choisi la chaux Belobaka, plus précisément la chaux produite par la Société SOABE.

La chaux que nous avons identifiée a été prélevée en vrac à la sortie de l'endroit où elle a été fabriquée tout en respectant les mêmes précautions de conservations que le sol.

CHAPITRE 2. IDENTIFICATION DU SOL

Les essais effectués sur le sol ont été effectués au laboratoire LNTPB et au laboratoire de Chimie de l'ESPA.

II. 1. Identification chimique du sol :

L'identification chimique du sol argileux se fait par méthode de fusion alcaline (*Annexe N°1*) afin de déterminer les éléments majeurs, c'est-à-dire les oxydes. À partir de cette méthode nous pouvons obtenir :

- ➔ la teneur en oxyde de fer (Fe_2O_3) ;
- ➔ la teneur en alumine (Al_2O_3) ;
- ➔ la teneur en oxyde de calcium (CaO) ;
- ➔ la teneur en magnésium (MgO) ;
- ➔ et enfin la teneur en silice (SiO_2) du sol.

La méthode de fusion alcaline est généralement utilisée pour déterminer les éléments contenus dans les cendres, les charbons, les argiles et les latérites.

Afin de compléter l'identification chimique nous allons déterminer la perte au feu de notre échantillon (*Annexe N°1*). La perte au feu s'explique essentiellement par :

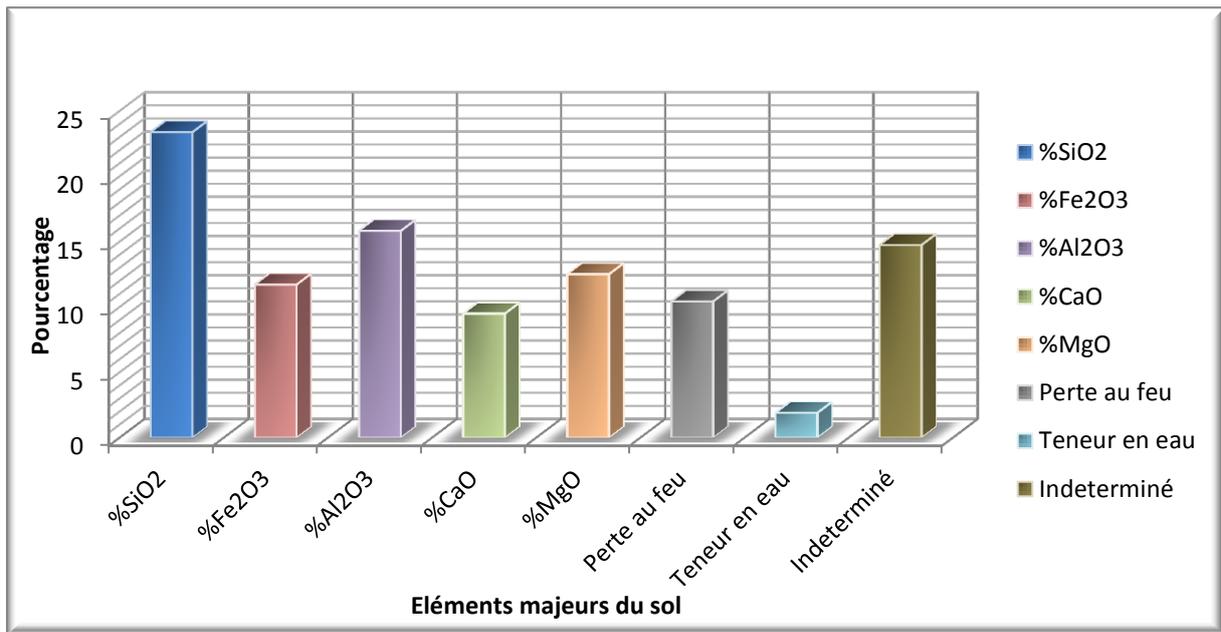
- ➔ la déshydratation et/ou la déshydroxylation des hydroxydes, oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, des minéraux argileux avec perte d'eau d'hydratation et/ou de constitution ;
- ➔ la décomposition des carbonates et des matières organiques.

L'essai effectué a donné le résultat suivant :

Tableau 8 : Composition chimique de l'échantillon de sol

Éléments	Teneur(%)
Perte au feu	10,43
SiO₂	23,38
Fe₂O₃	11,72
Al₂O₃	15,82
CaO	9,49
MgO	12,51
Teneur en eau	2,00
Indéterminés	14,75
Total	100 %

Source : Auteur



Courbe 1 : Éléments majeurs contenus dans le sol

Nous voyons dans cette courbe que, parmi les oxydes, l'échantillon a une faible teneur en Oxyde de Calcium ; par contre la teneur en silice est assez élevée. Il y a encore 14,75 % d'éléments indéterminés, ce sont les autres Oxydes qui n'ont pas été identifiés pendant l'essai comme par exemple le Dioxyde de Titane(TiO₂), l'Oxyde de Manganèse (MnO), etc... La faible teneur en Fe₂O₃ du sol explique la nature argilo-limoneuse du sol.

II. 2. Détermination des paramètres de nature :

II. 2. 1. La granularité (normes P 94-056) :

Cette norme décrit l'essai « granulométrie par tamisage ».

II. 2. 1. 1. But de l'essai :

Déterminer la granularité (c'est-à-dire la répartition granulaire) des sols et des granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,08 mm et 80 mm.

II. 2. 1. 2. Principe:

Fractionner au moyen d'une série de tamis à mailles carrées, un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses sèches des différents refus, ou celles des différents tamisât (passants au tamis), sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont

exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous forme graphique (courbe granulométrique).

II. 2. 1. 3. Appareillage :

● Colonne de tamis (*Photo 6*) :

Tamis à mailles carrées selon la norme NF P 18-304 (Pour les sols : tamis de modules 20-23-27-31-36-38-40-42-44-46-47-48-49-50) ;

● dispositif de lavage, étuve à thermostat, balance de précision, bacs de lavage, pinceau, récipients.



Photo 6 : Série de tamis normalisée

II. 2. 1. 4. Mode opératoire :

a. Préparation :

- Prélever un échantillon par quartage tel que la masse humide M_h de sol à prélever soit compris entre $300D$ et $500D$, D étant le diamètre du plus gros grain ;
- déterminer la teneur en eau de l'échantillon soit w (NF P 94-050) ;
- tremper dans l'eau pendant au moins 12 heures ;
- laver sur un tamis de dimension $0,08$ mm jusqu'à ce que l'eau s'écoulant sous le tamis de lavage soit claire ;
- récupérer le refus et sécher dans l'étuve et peser sa masse sèche soit M_{s1} .

b. Essais :

Le matériau sec est tamisé sur dans colonne de tamis, emboîtés de haut en bas dans l'ordre d'ouverture décroissante. Le refus de chaque tamis est pesé et cumulé allant de la plus grande maille de tamis jusqu'à la plus petite. Soit $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ les refus cumulés correspondant aux différentes ouvertures de tamis. Peser ensuite le tamisât du dernier tamis s'il y en a, soit T_n cette masse.

II. 2. 1. 5. Formule :

➡ *Pourcentage de passants cumulés(%) :*

$$\% \text{ passants cumulée} = 100 - \% \text{ refus cumulée}$$

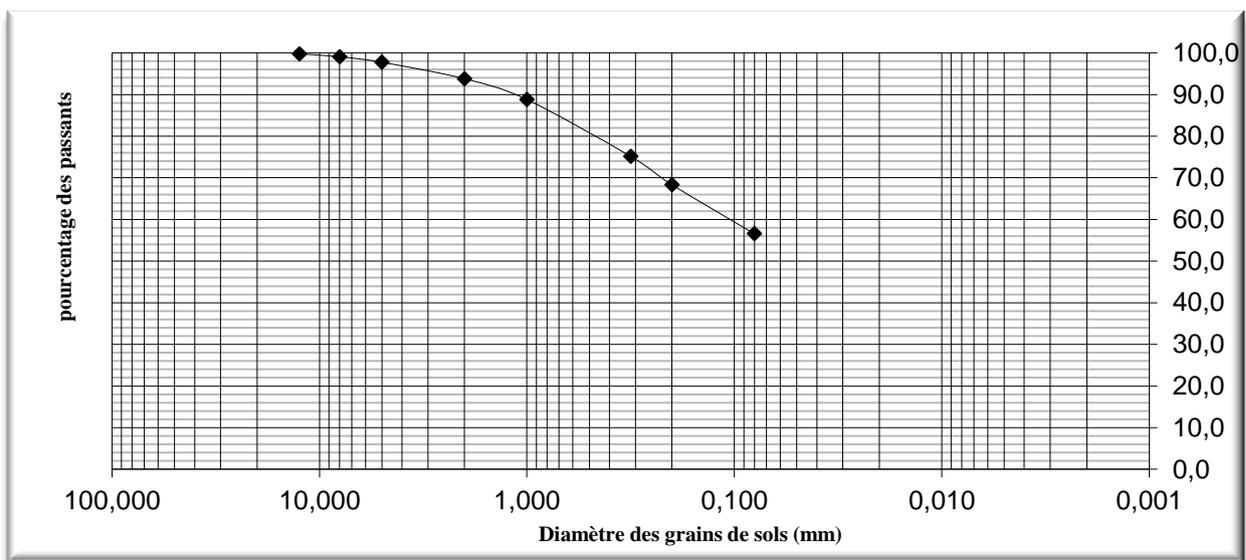
Remarque :

La somme des masses R_n (refus cumulé au dernier tamis) et T_n ne doit pas différer de plus de 2 % de la masse M_{s1} c'est-à-dire :

$$\frac{(R_n + T_n)}{M_{s1}} \times 100 \geq 98\%$$

II. 2. 1. 6. Résultats :

L'exemple de calcul est donné à l'Annexe N°2 et la courbe granulométrique est donnée dans un graphique à l'échelle semi-logarithmique (*Courbe 2*).



Courbe 2 : Courbe granulométrique par tamisage

II. 2. 1. 7. Conclusion (interprétation des résultats) :

La courbe granulométrique nous montre une allure étalée, c'est-à-dire que la granulométrie du sol est continue et étalée ; nous n'avons pas besoin de corriger la granulométrie du sol.

Pour les éléments $\geq 0,2$ mm nous avons 68 %. Nous obtenons le pourcentage des fines à partir de la courbe, c'est le pourcentage des éléments passant au tamis 0,08mm **%F=57%**. Ce pourcentage nous montre déjà que notre sol a une teneur assez élevée en matière argileuse.

II. 2. 2. L'argilosité :

L'argilosité mesure la plasticité du sol à partir des limites d'Atterberg (norme NF P 94-051) ou à partir de la valeur au bleu du sol VBS.

Pour notre essai nous procéderons à la première méthode, c'est-à-dire les limites d'Atterberg.

II. 2. 2. 1. But de l'essai :

Déterminer les limites d'Atterberg, c'est-à-dire la limite de liquidité et la limite de plasticité, afin de classer un sol.

II. 2. 2. 2. Principe de l'essai :

Déterminer :

- ➔ la limite de liquidité w_L (seuil de passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique) à l'aide de l'appareil de Casagrande ;
- ➔ la limite de plasticité w_P (seuil de passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide) par formation de rouleaux de 3 mm de diamètre ;
- ➔ et l'indice de plasticité I_p en fonction de la variation de la teneur en eau.

L'essai consiste à varier la teneur en eau de sols fins doués de cohésion éventuellement les sols graveleux, caillouteux ou pierreux contenant une fraction d'éléments fins généralement doués de cohésions.

II. 2. 2. 3. Appareillage :

- Appareil de Casagrande (*Figure 6* et *Photo 7*)
- tamis de 0,40 mm d'ouverture ;
- plaque de marbre ou de verre (*Photo 9*);
- une barrette étalon de 3 mm de diamètre ;
- récipients, siphon, spatules à malaxer, coupelles à malaxer, boîtes de pétri (*Photo 8*), balance de précision, étuve, poste de lavage.



Photo 7 : Appareil de Casagrande



Photo 8 : Boîtes de pétris



Photo 9 : Plaque de marbre

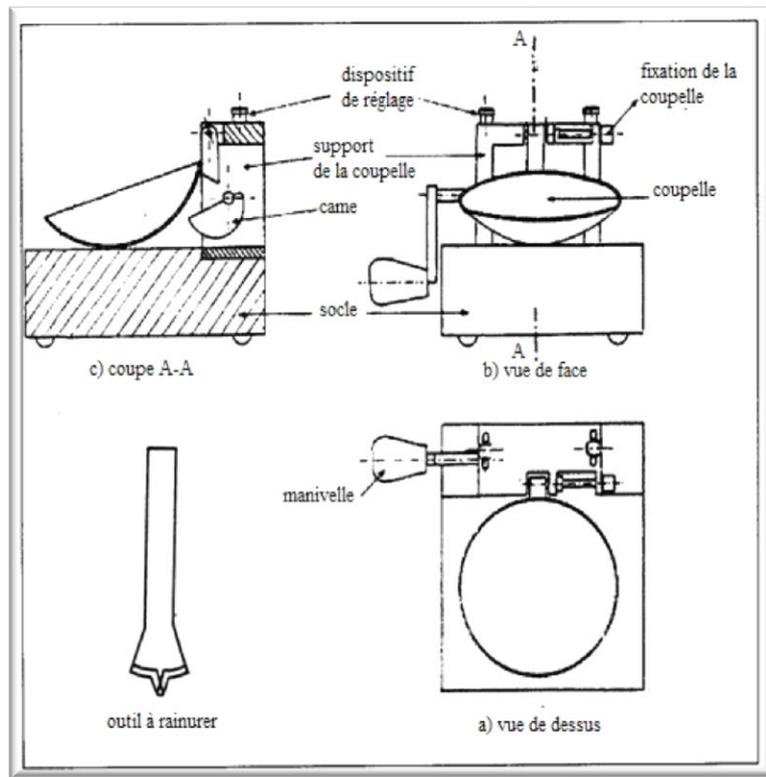


Figure 6 : Appareil de Casagrande

II. 2. 2. 4. Mode opératoire :

a. Préparation :

Tout d'abord, peser entre 150 à 200 g d'échantillon (passant au tamis 2mm) puis imbiber dans un récipient pendant au moins 24h. Ensuite, laver sur un tamis d'ouverture 0,40 mm en

récupérant intégralement les eaux de lavage dans un récipient. Récupérer aussi le refus pour le sécher à l'étuve pour le retamiser à sec sur un tamis d'ouverture 0,40 mm, le tamisât obtenu est versé dans l'eau de lavage. Puis laisser l'eau se décanter pendant quelques heures (*Photo 10*) et siphonner l'eau claire pour obtenir une pâte.



Photo 10 : Décantation du tamisât

b. Essais :

Limite de liquidité :

La pâte est séchée en la malaxant à l'aide d'une spatule afin d'obtenir un mélange bien homogène et fluide. Environ 70 g de pâte est ajouté dans la coupelle répartie en 3 couches bien tassées et partager en deux parties à l'aide de l'outil à rainurer tenu perpendiculairement à la surface de la coupelle.

La manivelle est tournée avec une cadence de deux chocs par seconde et une hauteur de chute de 1 cm jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent à la base sur une longueur de 10 mm, noter le nombre de chocs à cet instant et prélever deux échantillons pour déterminer la teneur en eau moyenne.

L'opération est répétée avec plusieurs teneurs en eau différentes (teneurs en eau décroissantes), en aérant le matériau et en malaxant le matériau dans le bol pour diminuer sa teneur en eau ;

La limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à 25 coups (chocs).

☛ *Limite de plasticité :*

- Avec le même mortier qui a servi à déterminer la limite de liquidité, sécher à l'air en l'étalant sur la plaque de verre ou de marbre ;
- faire une boulette roulée sur la plaque de façon à former un rouleau que l'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre et 10 à 15 cm de longueur (*Photo 11*)
- le rouleau (boudin) ne doit pas être creux ;
- la vérification du boudin s'effectue à l'aide de la barrette-étalon ;
- la limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau se fissure en le soulevant de 1 à 2 cm en son milieu ;
- on prend deux morceaux du rouleau à proximité de la rupture pour les placer dans deux boîtes de pétri préalablement tarés pour prendre leurs teneurs en eau par étuvage (*Photo 12*);
- refaire l'opération avec un autre échantillon pour obtenir une teneur en eau moyenne.

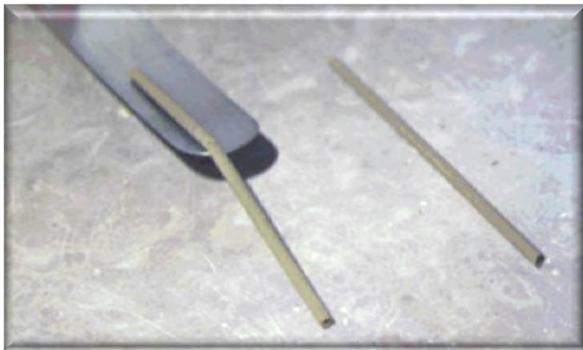


Photo 11 : Boudin de 3 mm de diamètre et 10 mm de longueur



Photo 12 : Détermination de la teneur en eau

II. 2. 2. 5. Formule :

☛ *Limite de liquidité w_L :*

On calcule la teneur en eau moyenne correspondant à chaque nombre de coups de coupelle :

$$w_i = \frac{M_{ei}}{M_{si}} \times 100$$

$$w_{moy} = \frac{w_1 + w_2}{2}$$

w_i = teneur en eau (i varie de 1 à 2)

M_{ei} = masse d'eau de i

M_{si} = masse sèche de i

w_{moy} = moyenne des deux teneurs en eau

w_L : correspond à la teneur en eau à 25 coups, elle est déterminée graphiquement.

➡ *Limite de plasticité :*

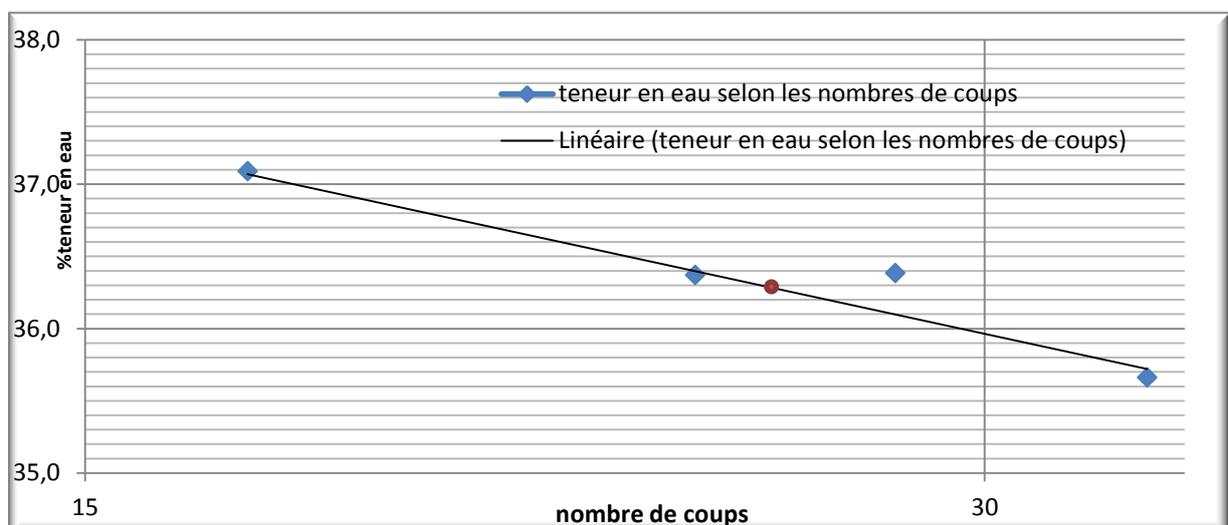
Même méthode de calcul de la teneur en eau que w_L . La valeur de l'indice de plasticité est la moyenne des deux teneurs en eau obtenues.

➡ *Indice de plasticité :*

$$I_p = w_L - W_p$$

II. 2. 2. 6. Résultats :

Les données sont recueillies dans le tableau à l'Annexe N°2, la valeur de la limite de liquidité est déterminée graphiquement comme la montre la figure ci-dessous :



Courbe 3 : Courbe de la limite de liquidité

Le résultat obtenu après calcul est résumé dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Valeur des limites d'Atterberg

RÉSULTATS (%)	
LIMITE DE LIQUIDITÉ WL(%)	36,3
LIMITE DE PLASTICITÉ Wp(%)	18,9
INDICE DE PLASTICITÉ Ip = WL - Wp (%)	17,4

Source : Auteur

II. 2. 2. 7. Interprétation :

L'obtention de ces trois valeurs nous permet de déterminer la nature de notre sol et de le classer, nous avons de nombreuses méthodes pour cela, mais nous allons employer la méthode employée par le laboratoire de la LNTPB qui est la méthode HRB, LPC, GTR.

Nous avons les valeurs suivantes :

Tableau 10 : Paramètres d'identification de la nature du sol

Désignation	Unité	Valeur
Teneur en eau (W)	%	2,1
Pourcentage des fines (%F)	%	57
Limite de liquidité (WL)	%	36,3
Limite de plasticité (WP)	%	18,9
Indice de plasticité (Ip)	-	17,4

Source : Auteur

a. Classification selon la méthode HRB :

Pour cette méthode, il nous suffit de lire sur le tableau à l'Annexe N°3 et d'en conclure la classe du sol.

Pour $w_L=36,3$; $w_p=18,9$; $I_p = 17,4$, nous avons donc **un sol de classe A6**, qui est un sol argileux, cette classe montre que notre sol contient encore une quantité de limon inférieur à celle de l'argile.

b. Classification selon la méthode LPC :

$$\alpha = 0,73 \times (w_L - 20) = 11,9$$

On lit dans le tableau de classification (*Annexe N°4*), nous avons un **sol de classe Ap** ce qui veut dire argile peu plastique.

c. Classification selon la méthode GTR (méthode utilisée pour la norme NF P 11 300) :

Connaissant la valeur d' I_p et de %F nous lisons à partir des tableaux (*Annexe N°5*) que **le sol est de type A2**. On trouve dans les sols de types A2 les sables fins argileux, les limons, les argiles et marnes peu plastiques et les arènes.

Ces classifications vérifient notre identification visuelle qui est de l'argile limoneuse.

II. 3. Détermination des paramètres de comportement mécanique :

Pour les sols fins, la détermination de cette valeur n'est pas vraiment nécessaire et indispensable à l'identification du sol, donc nous passerons directement à la détermination des paramètres d'état.

II. 4. Détermination des paramètres d'état :

Comme nous avons vu dans le paragraphe précédent (Détermination des paramètres de nature : que notre sol est un sol moyennement argileux, nous opterons pour la détermination de l'état hydrique à l'aide de la position de la teneur en eau naturelle par rapport aux limites d'Atterberg s'exprimant par l'*Indice de consistance (Ic)*.

II. 4. 1. Détermination de la teneur en eau naturelle:

La teneur en eau naturelle est déterminée selon la méthode de détermination de la teneur en eau pondérale des sols par étuvage (norme NF P 94-050).

II. 4. 1. 1. But de l'essai :

Déterminer la teneur en eau de l'échantillon étudié.

II. 4. 1. 2. Principe de l'essai :

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

II. 4. 1. 3. Appareillage :

- ➔ Balance de précision adaptée au poids de la prise (*Photo 13*) ;
- ➔ boîtes de pétri ou godets, capsules, spatules, étuve réglable de 50 à 105 °C (*Photo 14*).

II. 4. 1. 4. Mode opératoire :

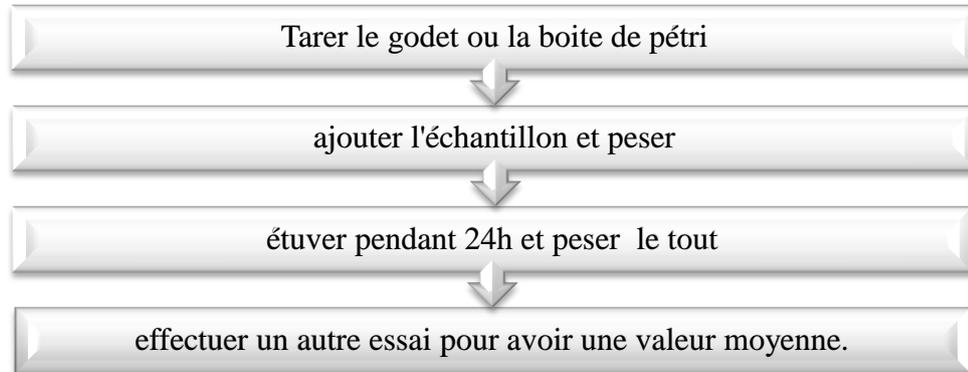


Photo 13 : Balance de précision



Photo 14 : Étuve à température réglable

II. 4. 1. 5. Formule :

➔ *Teneur en eau w (%) :*

$$w_i = \frac{Me}{Ms} \times 100$$

$$w_n = \frac{W_1 + W_2}{2}$$

Avec : Me = masse d'eau (g), Ms = masse sèche de l'échantillon(g).

II. 4. 1. 6. Résultats :

En faisant la moyenne des deux essais effectués, notre essai nous a donné une valeur de teneur en eau de : $w_n=1,9\%$.

II. 4. 2. Détermination de l'indice de consistance I_c (norme NF P 94-051):

II. 4. 2. 1. Calcul d' I_c :

L'indice de consistance ou I_c est le rapport défini par la formule suivante :

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_p}$$

Où :

- w_L : limite de liquidité ;
- w_n : est la teneur en eau du sol dans son état naturel et ne comportant pas d'éléments supérieurs à 400 μm ;
- I_p : indice de plasticité.

Déterminé précédemment, nous avons eu les valeurs suivantes :

$$w_n = 1,9\% ; w_L = 36,3\% ; I_p = 17,4$$

$$I_c = \frac{36,3 - 1,9}{17,4} = 1,97$$

II. 4. 2. 2. Résultat :

Nous avons obtenu la valeur de $I_c = 1,97$.

II. 4. 2. 3. Interprétation :

Le tableau à l'Annexe N°5 montre l'état hydrique du sol selon sa classification. Nous pouvons déduire en lisant à partir du tableau que notre sol se trouve à l'état très sec c'est-à-dire que notre sol est un sol de classe A_{2ts} pour la classification selon l'état hydrique. À l'état hydrique très sec, le sol ne montre aucune cohésion ni adhérence.

II. 5. Autres paramètres :

Nous tenons aussi à déterminer certains paramètres du sol naturel qui pourraient aider à connaître les propriétés physiques, de compactage et de portance du sol naturel, les essais que nous effectuerons sont :

- ➔ La détermination de la densité spécifique ;
- ➔ la détermination de la densité apparente ;

- l'essai de compactage ;
- l'essai de portance.

II. 5. 1. Détermination de la densité spécifique :

La détermination de la densité spécifique ou la masse volumique des particules solides des sols est régie par la norme NF P 94-054, elle est déterminée pour connaître l'indice des vides du sol.

II. 5. 1. 1. But de l'essai :

Déterminer le poids volumique des particules solides d'un matériau dont les éléments sont inférieurs à 4 mm.

II. 5. 1. 2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer le poids et le volume des grains solides et à en déterminer le rapport en utilisant un pycnomètre pour obtenir le volume des matériaux sans vides.

II. 5. 1. 3. Appareillage :

Balance de précision, pycnomètre (*Photo 15*), pompe à vide, tamis de 4 mm, étuve, eau distillée.



Photo 15 : Pycnomètres

II. 5. 1. 4. Mode opératoire :

a. Préparation :

Tout d'abord, tamiser sur tamis 4 mm. Puis étuver le tamisât pour que l'échantillon soit bien sec.

b. Essais :

- L'essai s'effectue à température ambiante (20 °C) ;
- peser le pycnomètre vide avec son bouchon ;
- remplir le pycnomètre d'eau distillée et remettre le bouchon, peser ;
- verser l'échantillon sec dans le pycnomètre et peser ;
- remplir d'eau distillée le pycnomètre, couvrir et le mettre dans une cloche à vide pour enlever le gaz dans le mélange eau-sol ;
- laisser se décanter pendant 24 heures ;
- peser le pycnomètre + échantillon + eau ;
- faire au moins deux essais pour chaque échantillon.

II. 5. 1. 5. Mise au net :

👉 Le poids volumique γ_s est donné par :

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \times g$$

Avec : M_s = masse sèche de l'échantillon (g), V_s = volume des solides (cm³).

Deux essais ont été effectués afin d'obtenir une valeur moyenne.

II. 5. 1. 6. Résultats :

Notre essai a permis d'obtenir $\gamma_s = 26,8 \text{ KN} / \text{m}^3$.

II. 5. 2. Détermination de la densité apparente :

II. 5. 2. 1. But de l'essai :

Déterminer le poids volumique des particules solides d'un matériau dont les éléments sont supérieurs à 4 mm.

II. 5. 2. 2. Principe de l'essai :

Mesurer le poids et le volume des grains solides et à en déterminer le rapport par la méthode de pesée hydrostatique.

II. 5. 2. 3. Appareillage :

Balance hydrostatique, balance de précision, bain thermostatique (*Photo 16*), paraffine, godet, étuve à 105 °C.



Photo 16 : Bain thermostatique

II. 5. 2. 4. Mode opératoire :

a. Préparation :

L'échantillon prélevé doit être intact ou reconstitué pour faire l'essai. On prélève un échantillon supérieur à 7 cm d'épaisseur.

Prélever un autre échantillon de ce même sol dans un godet pour avoir sa teneur en eau.

b. Essai :

- ➔ Peser l'échantillon soit $M_{éch}$;
- ➔ paraffiner dans le bain thermostatique à une température de 70 °C ;
- ➔ peser l'échantillon paraffiné à l'air, puis sous l'eau pour en déduire le volume de l'échantillon.

II. 5. 2. 5. Mise au net :

Notre essai nous a permis d'avoir la teneur en eau w , la masse de l'échantillon, la masse de l'échantillon + paraffine à l'air, la masse de l'échantillon + paraffine sous l'eau. Ces paramètres nous permettront de calculer le poids volumique sec du matériau.

Formule :

➔ *Poids volumique humide γ_h :*

$$\gamma_h = \frac{g \times M_{éch}}{V_{éch}}$$

avec : $M_{éch}$: masse humide de l'échantillon (g)

➔ Poids volumique sec γ_d ou poids volumique apparent :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + w)}$$

Avec : w = teneur en eau (%)

II. 5. 2. 6. Résultats :

Nous avons $\gamma_d = 19,0 \text{KN/m}^3$.

II. 5. 3. Essai de compactage :

L'essai Proctor modifié (norme NF P 94-093) est utilisé pour les travaux routiers.

II. 5. 3. 1. But de l'essai :

Déterminer la densité de référence « $\gamma_{d \text{ max}}$ » et la teneur en eau optimum « w_{opt} » en fonction de la teneur en eau.

II. 5. 3. 2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée suivant un processus bien défini, un échantillon du matériau à étudier pour en déterminer sa teneur en eau et son poids volumique sec après compactage.

On distingue :

- ➔ l'essai Proctor Normal pour les travaux hydrauliques ;
- ➔ l'essai Proctor Modifié pour les travaux de type routier.

Dans les deux cas, l'essai s'effectue dans un moule CBR sur des matériaux passant au tamis à mailles carrées de 20 mm (module 44).

II. 5. 3. 3. Appareillage :

- Moule Proctor (*Figure 7*)
- un socle : bloc de béton de dimension minimale 400x400x250mm sur lequel repose le moule ;
- dame Proctor Modifié de masse 4535 g avec une hauteur de chute 457mm (*Figure 7*) ;
- plane à araser constituée d'une lame métallique d'environ 30x200mm;
- tamis à mailles carrées de 20mm ;
- bac de malaxage ;
- truelle, spatule, éprouvette graduée, godet, balance de précision, étuve, burin et marteau pour démouler.

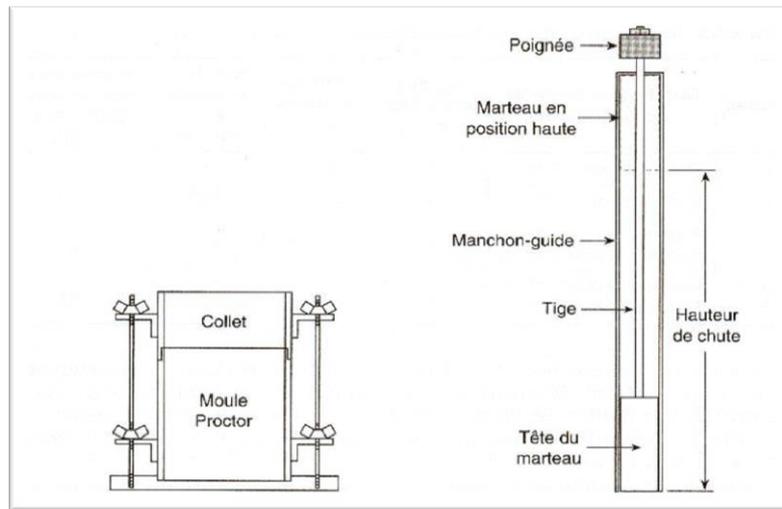


Figure 7 : Moule et dame Proctor

II. 5. 3. 4. Mode opératoire :

a. Préparation :

Le matériau est tamisé sur le tamis à mailles carrées de 20mm, prendre le tamisât pour effectuer l'essai. La masse nécessaire pour chaque moulage est de 6Kg.

b. Essais :

Quantité d'eau :

- Prélever la teneur en eau naturelle de l'échantillon ;
- si l'échantillon est trop humide, sécher à l'air ; s'il est trop sec, légèrement humidifier à une teneur en eau largement inférieure à la teneur en eau optimum de façon à éviter les pertes de fines et la ségrégation des matériaux ;
- les teneurs en eau correspondant aux points expérimentaux sont à peu près réparties de part et d'autre de la teneur en eau optimale supposée ;
- identifier à vue la teneur en eau optimum d'un matériau courant à quelque pourcentage près (par expérience de l'opérateur) ;
- l'essai se fait en plusieurs points de teneur en eau différentes ;
- si cette teneur en eau est trop élevée, l'on sèchera le matériau à l'air sinon, l'on ajoutera la quantité d'eau nécessaire ;
- le matériau est humidifié par addition progressive de la quantité d'eau mesurée sur l'éprouvette et malaxé pour obtenir un mélange bien homogène;
- pour les sols argileux (ce qui est le cas de notre sol), cette humidification est effectuée quelques heures avant le compactage.

☛ Compactage :

- Remplir la moule, qui a été préalablement pesée, à raison de 5 couches de 2,5 cm environ en damant chaque couche à raison de 55 coups de dame Proctor Modifié par couche ;
- enlever la hausse après compactage de la dernière couche : le niveau du matériau est d'environ 1 cm au-dessus du niveau supérieur du moule ;
- araser la partie excédentaire ;
- peser le moule contenant le matériau ;
- prélever deux échantillons pour déterminer la teneur en eau ;
- démouler à l'aide du burin et du marteau ;
- le premier point de la courbe étant ainsi obtenu, l'on recommencera les mêmes opérations que précédemment après avoir ajouté la quantité d'eau qui correspond à une variation approximative de la teneur en eau d'environ $\pm 2\%$;
- les autres points seront obtenus en répétant la même opération après avoir ajouté entre chaque point les mêmes quantités d'eau qui ont différencié le 1^{er} et la 2^{ème} opération jusqu'à ce que le poids humide de la moule + échantillon diminue.

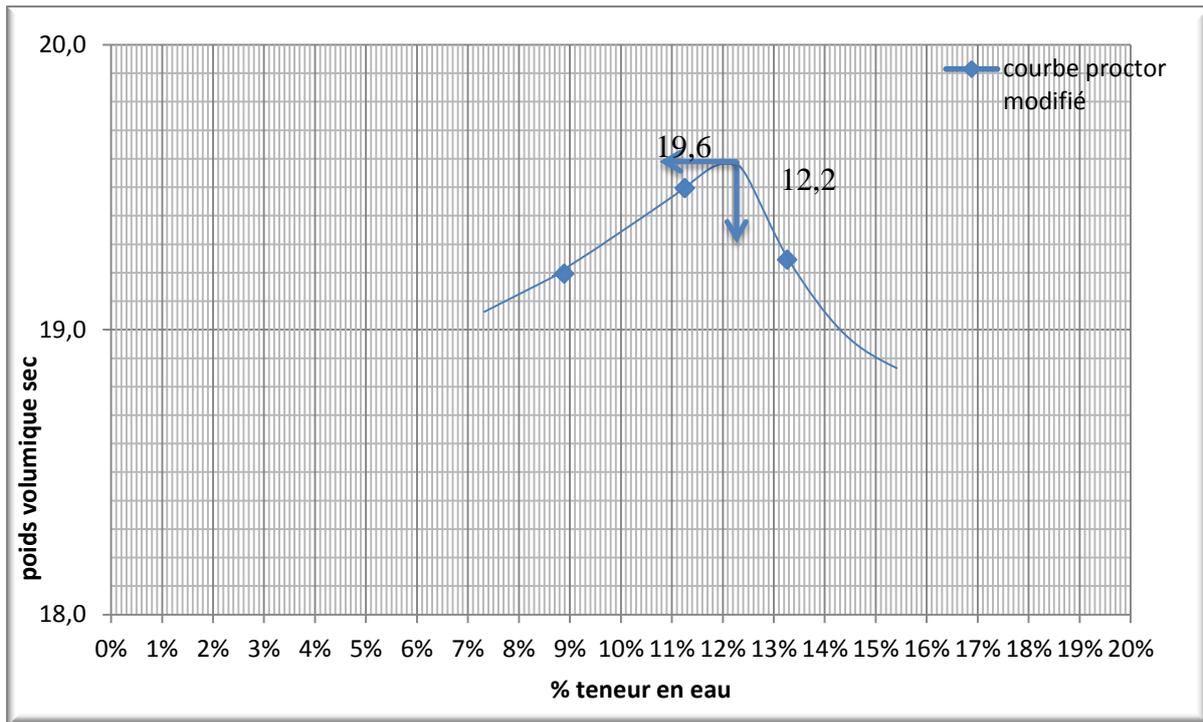
II. 5. 3. 5. Formule :

☛ Poids volumique sec :

$$\gamma_d = \frac{100 \times \gamma_h}{100 + w_{moy}}$$

II. 5. 3. 6. Résultats :

Le résultat du calcul est résumé dans un tableau (*Annexe N°6*) et tracé dans le graphe ci-dessous pour obtenir la teneur en eau optimum $w_{opt} = 12,2\%$ et la densité de référence $\gamma_{d\max} = 19,6\text{KN/m}^3$.



Courbe 4 : Courbe Proctor modifié du sol sans stabilisation.

II. 5. 4. L'essai de portance :

II. 5. 4. 1. CBR sans immersion ou à 0jour :

a. But de l'essai :

Déterminer l'indice de compacité CBR et/ ou l'indice Portant pour la plateforme et le corps de chaussée.

b. Principe de l'essai :

L'essai consiste à compacter l'échantillon en ajoutant l'eau nécessaire et à le poinçonner sans que le matériau ne soit immergé, mais pour notre cas nous n'avons pas procédé au poinçonnement du fait que nous voulons observer le comportement du sol dans des cas extrêmement défavorables, alors nous procédons au poinçonnement à l'essai CBR après 4jour d'immersion; nous effectuons l'essai CBR à 4jours d'immersion pour obtenir l'indice de portance CBR.

Notre essai CBR à 0j ne comportera donc pas de poinçonnement mais servira uniquement à déterminer l'indice de compacité du sol.

c. Appareillage :

- Même appareillage que l'essai Proctor Modifié ;
- disque perforé.

d. Mode opératoire :

➤ *Préparation :*

- Peser 6000g d'échantillon humide ;
- déterminer la teneur en eau naturelle de l'échantillon afin de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau optimale;
- ajouter la quantité d'eau nécessaire pour obtenir sa teneur en eau optimale et malaxer vigoureusement ;
- vérifier la teneur en eau modifiée ;
- déterminer son poids volumique sec.

➤ *Essais :*

L'opération est semblable à l'essai Proctor Modifié sauf que l'énergie de compactage est variable selon les sollicitations auquel le matériau est sollicité ; pour notre cas pour une charge maximale pour une couche de roulement de route en terre on prend comme énergie de compactage 25 coups par couche.

- Peser le moule ;
- introduire la 1ère couche de matériau ;
- compacter la 1ère couche à l'aide d'une dame Proctor en appliquant 25 coups (*Photo 17*);
- introduire successivement les 4 autres couches et recommencer les mêmes opérations de compactage à raison 25 coups par couche ;
- enlever la hausse ;
- Araser (*Photo 18*) ;
- enlever l'embase et le disque d'espacement ;
- peser le moule contenant le sol.



Photo 17 : Compactage



Photo 18 : Arasement

e. *Mise au net :*

Formule :

Indice de compacité I_c (%) :

$$I_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d\text{ opt}}} \times 100$$

f. *Résultats :*

Les valeurs obtenues durant l'essai sont recueillies dans le tableau à l'Annexe N°7. Notre essai nous a permis d'avoir un indice de compacité I_c CBR= 94,6 %.

II. 5. 4. 2. CBR avec immersion ou 4jours (S 11):

a. *But de l'essai :*

Vérifier la teneur en eau optimale de l'essai Proctor et déterminer l'indice portant du matériau après 4 jours d'immersion, déterminer la portance du sol après qu'il a été soumis aux conditions défavorables.

Cet essai simule le comportement du matériau pendant son utilisation lorsqu'il est soumis aux différentes sollicitations comme la charge du trafic, les remontées d'eau interstitielles, les eaux de pluie.

b. Principe de l'essai :

L'essai consiste à compacter l'échantillon en ajoutant l'eau nécessaire et à le poinçonner après 4 jours d'immersion.

c. Appareillage :

- Même appareillage que l'essai Proctor modifié ;
- anneau de surcharge ($\sim 4\text{kg}$), disque perforé, comparateur à $1/100\text{mm}$ et de 10mm de course, bac d'imbibition ;
- presse CBR (*Photo 19*) complet muni :
 - d'un piston de poinçonnement de $19,35\text{ cm}^2$ de section fixé à la partie supérieure du bâti par l'intermédiaire d'un anneau dynamométrique de 10KN , 30KN ou 60KN suivant la force de la presse;
 - d'un indicateur de cadence comportant un disque muni d'un repère qui tourne à raison de $1,27\text{ tr/min}$ qui sert de repère pendant la manœuvre de la presse.



Photo 19 : Presse CBR

d. Mode opératoire :

➤ Préparation :

Même opération que pour la préparation de l'essai CBR à 0jour.

➤ Essais :

Compactage :

Toutes les opérations effectuées dans l'essai CBR à 0jour sont suivis.

Imbibition :

- Mettre en place le plateau de gonflement perforé ;
- placer les anneaux de surcharges, le trépied porte comparateur et fixer le comparateur ;
- régler la hauteur de la tige au plateau de gonflement de façon que le palpeur du comparateur vienne reposer sur l'extrémité de cette tige ;
- noter sur la feuille d'essai la lecture initiale ;
- imbiber pendant 4jours (*Photo 20*) dans le bac d'imbibition (l'imbibition consiste à soumettre à l'échantillon différentes sollicitations, c'est-à-dire les remontées d'eau capillaires et les infiltrations d'eaux superficielles et d'en mesurer le gonflement relatif);
- faire la mesure de gonflement tous les 24heures ;
- après 4jour d'imbibition retirer le moule du bac, enlever le trépied, le comparateur et le plateau de gonflement ;
- laisser égoutter le moule pendant une dizaine de minutes avant de commencer le poinçonnement.



Photo 20 : Anneaux de surcharge et plateau de gonflement, mise en place du comparateur et imbibition des moules

Poinçonnement :

- Placer le moule sur le plateau de la presse en le centrant de telle façon que le piston de poinçonnement et le moule soient sur le même axe ;
- surcharger l'échantillon avec la charge correspondant le plus près possible à sa surcharge réelle en ajoutant le nombre d'anneau nécessaire (pour notre cas 4 anneaux) ;
- se mette au volant de la presse et commencer le poinçonnement où le rayon repère de l'indicateur de cadence vient se superposer à l'aiguille du comparateur ;
- au cours du poinçonnement, noter les charges lues sur l'anneau du dynamomètre qui correspondent aux enfoncements suivants (en mm): 0,20 / 0,40 / 0,60 / 0,80 / 1,00 / 1,25 / 1,50 / 2,00 / 2,50 / 3,00 / 3,50 / 4,00 / 4,50 / 5,00 / 5,50 / 6,00 / 6,50 / 7,00 / 7,50 ;
- arrêter le poinçonnement quand on atteint un poinçonnement de 7,50 mm
- prélever deux échantillons à la surface de l'éprouvette et de chaque côté de l'empreinte laissée par le piston pour déterminer la teneur en eau après compactage et poinçonnement.

e. *Mise au net :*

Formule :

➤ Efforts d'enfoncement :

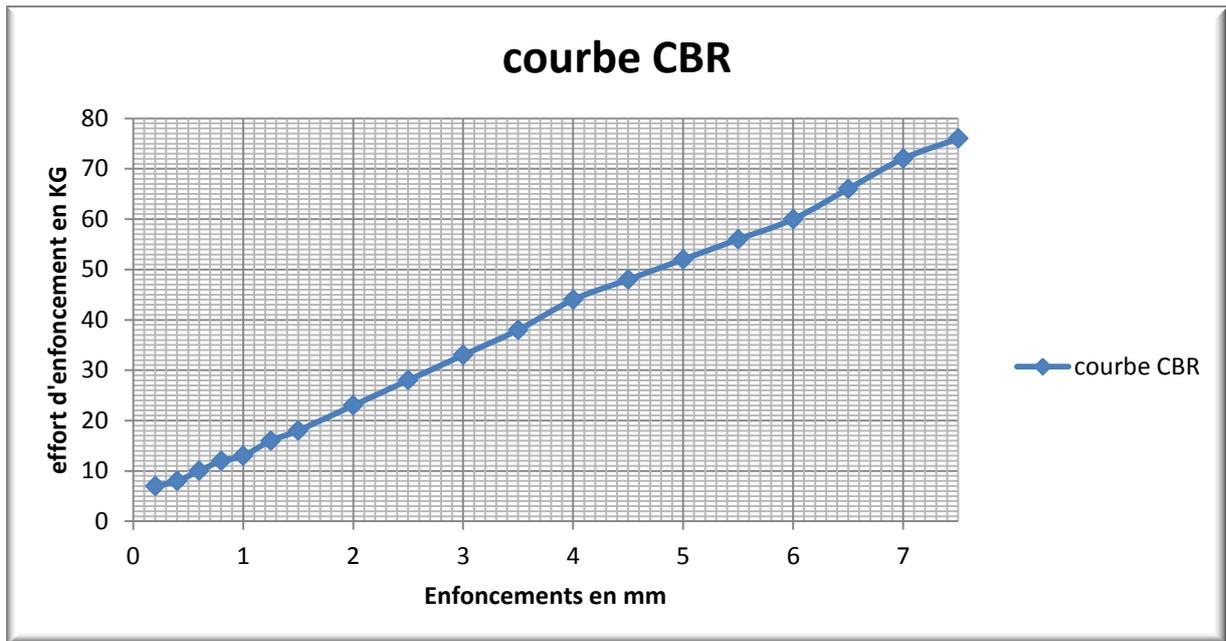
Pour un anneau de 5KN, une lecture correspond à une force de 2Kgf.

➤ Indice portant I_p :

Les efforts d'enfoncements sont tracés en graphe (*Courbe 5*) et on obtient ensuite les valeurs corrigées de $F(2,5)$ et de $F(5)$.

▪ À 2,5 mm :
$$I_p = \frac{F(2,5)}{13,51} \times 100$$

▪ À 5 mm :
$$I_p = \frac{F(5)}{20,265} \times 100$$



Courbe 5 : Courbe CBR du sol sans stabilisation.

f. Résultats :

Le résultat est recueilli sous forme de tableau à l'Annexe N°7.

Notre essai nous a permis d'avoir un **gonflement relatif de 1,45 %** et un indice portant ou **Ip CBR=2,8** on encadre la valeur à **3**.

g. Interprétation :

Nous pouvons déduire à partir de cette valeur de l'indice de portance CBR que le sol a une faible portance et un gonflement non négligeable, le sol ne pourrait pas supporter d'être utilisé comme couche de forme dans son état naturel, ce qui explique son comportement lors des saisons de pluies.

CHAPITRE 3. IDENTIFICATION DE LA CHAUX

III. 1. Granulométrie par tamisage NF P 18-560:

La granulométrie de la chaux désigne la finesse de celle-ci. Cette finesse est déterminée par le passage aux tamis de 80 μ m, de 0,2 mm et de 2 mm.

La détermination de la granulométrie de la chaux consiste à tamiser à sec la chaux sur une série de tamis de 80 μ m, de 0,2 mm et de 2 mm pour en déterminer ensuite le pourcentage de refus et de tamisât. L'essai a été effectué au laboratoire de la LNTPB (*Photo 21*).



Photo 21 : Tamisage de la chaux

L'analyse granulométrique de la chaux a donné le résultat suivant :

Tableau 11 : Granulométrie de la chaux

Tamis	2 mm (module 34)	0,2 mm (module 24)	80 μ m (module 20)
%passant	99	91	52

Source : Auteur

Comme nous le voyons dans le tableau, la granulométrie de la chaux de Belobaka est conforme aux spécifications requises pour une stabilisation routière.

III. 2. La mesure de la teneur en chaux libre [29]:

La chaux disponible désigne la pureté chimique de la chaux, c'est-à-dire sa teneur en oxyde de calcium actif. La détermination de la teneur en chaux libre (%CaO) de la chaux se fait par la méthode de fusion alcaline, comme la détermination des éléments chimiques du sol (*Annexe N°1*). L'essai effectué au laboratoire de l'ESPA a donné les caractéristiques suivantes pour notre chaux :

Tableau 12 : Composition chimique de la chaux

	Teneur
SiO₂	0,07
Fe₂O₃	0,56
Al₂O₃	1,80
CaO	69,05
MgO	14,01
Teneur en eau	0,9

Source : Essai au Laboratoire ESPA [29]

Nous avons pu déduire à partir de cette analyse que l'indice d'hydraulicité de la chaux de Belobaka est $L = 0,03$.

La teneur en CaO de la chaux étudié est de 69,05%, c'est de la chaux grasse, ce qui dépasse largement la teneur en CaO exigée pour une stabilisation avec de la chaux éteinte.

CHAPITRE 4. TRAITEMENT À LA CHAUX

Nous avons effectué simultanément l'essai d'aptitude au traitement et la détermination du dosage adéquat en chaux.

L'essai consiste à déterminer la densité maximale et la teneur en eau optimum du dosage considérée et à déterminer son indice CBR après 4 jours d'immersion, c'est-à-dire en simulant son cas d'utilisation le plus défavorable (remontée d'eau, pluie, trafic, etc.).

Nous allons varier le dosage en chaux pour observer le comportement du matériau à différents dosages.

Nous allons donc effectuer un essai Proctor modifié et un essai CBR à 0jour sans poinçonnement et à 4jours avec immersion avec poinçonnement pour des dosages en chaux de 4 %, 6 %, et 8 %.

IV. 1. Objectif [9]:

L'objectif de l'étude de formulation est de déterminer :

- ➔ le dosage minimal en liant permettant de conférer une portance immédiate suffisante pour rendre possible la mise en œuvre ;
- ➔ l'aptitude au compactage et à supporter la circulation des engins de chantier en fonction de l'état hydrique des sols prévisibles à l'exécution.

IV. 2. Essai Proctor modifié:

Le principe et le mode opératoire est le même que l'essai Proctor du chapitre 2 paragraphe V, seules les modifications dues à l'ajout de chaux seront citées ici.

IV. 1. Préparation de l'échantillon et essai :

Soit x% le pourcentage de chaux à ajouter.

- Peser $M = 6000$ g de sol ;
- étaler dans le bac de malaxage ;
- ajouter la dose de chaux (*Photo 22*) M_c telle que $= \frac{M \times x}{100}$

Nous avons respectivement les valeurs 240g, 360g, 480 g de chaux pour les dosages en chaux de 4 %, 6 %, 8 %.

- veiller à ce que la chaux soit équitablement répartie sur le sol ;

- humidifier avec une teneur en eau variable ;
- malaxer pour obtenir un mélange bien homogène;
- laisser se reposer pendant 2h pour laisser la chaux agir avec le sol (*Photo 23*);
- poursuivre les mêmes étapes de l'essai Proctor.



Photo 22 : Ajout de la chaux



Photo 23 : Pose après malaxage

IV. 2. Résultats :

Le résultat de l'essai Proctor est résumé dans tableau suivant :

Tableau 13 : Densité maximum et teneur en eau optimum pour chaque dosage en chaux

Dosage	Quantité de chaux ajoutée (g)	Teneur en eau optimum (%)	Densité maximum (KN/m³)
4 %	240	13,1	19,5
6 %	360	13,5	19,3
8 %	480	14,0	19,2

Source : Auteur

Nous constatons que la valeur de la teneur en eau à l'optimum Proctor augmente tandis que celle de la densité maximale diminue, cela s'explique par un assèchement considérable du sol dû à la réaction avec la chaux, et aussi que l'apport de chaux améliore la compacité du sol.

IV. 3. Essai CBR :

IV. 3. 1. Préparation de l'échantillon et essai :

Même préparation que celui de l'essai CBR décrit auparavant sauf que le dosage en chaux et l'apport d'eau sont ceux qu'on a trouvés précédemment avec les valeurs à l'optimum Proctor. L'essai suit la même procédure que l'essai CBR que nous avons déjà effectué.

IV. 3. 2. Résultats :

Les résultats finals sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Résultat de l'essai CBR pour différents dosages en chaux

Dosage	Quantité de chaux ajoutée (g)	Poids d'eau ajoutée (cc)	Indice de compacité Ic	Indice CBR I CBR
4 %	240	610	94,2	78
6 %	360	670	94,7	84
8 %	480	690	94,9	99

Source : Auteur

D'après ce tableau, nous voyons que l'indice CBR et l'indice de compacité augmente au fur et à mesure que le dosage en chaux augmente, ce qui vérifie aussi que la chaux agit sur la portance de notre sol.

CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

V. 1. Sol:

Tableau 15 : Caractéristiques générales de notre sol

N° de l'échantillon	profondeur du prélèvement (en m)	Nature visuelle	Classification			
			HRB	LCP	GTR	état hydrique
STG/01	0/0,30		A6	Ap	A2	A2ts
Désignation			Unité	Valeur		
paramètre de nature	limites d'Atterberg	WL	%	36,3		
		Wp	%	18,9		
		Ip	%	17,4		
	Pourcentage des fines (%F) ou passants à 0,08mm		%	57		
	Passants à 0,2 mm		%	68		
État hydrique	Teneur en eau naturelle		%	1,9		
	Indice de consistance		-	1,97		
Autres	densité apparente γ_d		KN/m ³	19,0		
	densité spécifique γ_s		KN/m ³	26,8		
	compacité	Teneur en eau optimum	%	12,2		
		densité maximum	KN/m ³	19,6		
	portance	Indice de compacité Ic CBR	%	94,6		
		Gonflement relatif	%	1,45		
		Indice portant CBR Ip CBR	-	3		

Source : Auteur

La valeur de l'indice CBR de notre sol qui est égal à 3 est largement inférieure à la valeur minimale de l'indice CBR qui pourrait supporter une couche de base. En effet, il est admis à priori que les indices CBR, minimaux de matériaux pour couche de fondation et couche de base de routes à faible trafic (<300 véhicules par jour) sont les suivants :

- ➔ couche de fondation CBR>30 ;
- ➔ couche de base CBR>80.

Le sol a besoin d'être stabilisé. En général, il y a une multitude de types de sols passibles de traitements, et il y a aussi ceux qui ne le sont pas. Les types de sols susceptibles de recevoir un traitement à la chaux peuvent être les catégories de sols suivants : A1, A2, A3, B2, B6, B4, B5, CA1, CA2, CA3, CB2, CB4, CB5, et CB6 ; et les sols qui peuvent être traités à la chaux uniquement sont les sols qui sont moyennement plastiques, c'est-à-dire $10 \leq I_p \leq 25$ [30].

Notre sol pourrait donc être un meilleur cas pour une stabilisation à la chaux.

V. 2. Chaux :

Tableau 16 : Caractéristiques générales de la chaux

%passants au tamis			Teneur en CaO (%)	Indice d'hydraulicité
2 mm (module 34)	0,2 mm (module 24)	80 μ m (module 20)		
99	91	52	69,05	0,03

Source : Auteur

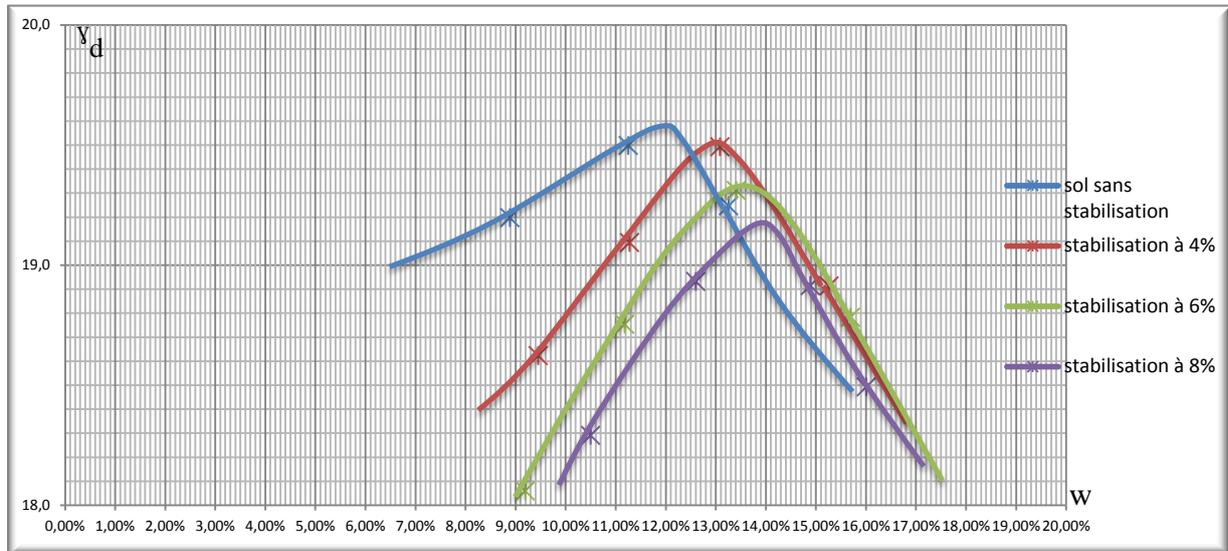
Ces différentes caractéristiques nous ont donnés la nature de la chaux, qui est de la chaux grasse. De plus les caractères granulométriques et chimiques de cette chaux entre dans les normes requises pour la stabilisation, elle est **utilisable pour la stabilisation de la route.**

V. 3. Stabilisation :

- ➔ Pendant la phase de préparation de l'échantillon à stabiliser, nous avons déjà observé quelques actions de la chaux sur le sol durant l'ajout de la chaux :
 - la teinte du mélange s'éclaircit au fur et à mesure que le dosage en chaux augmente ;
 - on observe que les particules fines des argiles s'agglomèrent et forment des grumeaux pour augmenter la dimension des grains, ce changement de granulométrie n'est qu'apparent, car ces grumeaux sont dus à la floculation cationique de l'argile avec la chaux. Ce qui montre déjà que la chaux agit avec le sol ;
 - pendant l'opération de malaxage et l'ajout de la teneur en eau, la chaux dégage une légère odeur ;
 - l'ajout de la chaux produit un assèchement, la quantité d'eau ajoutée a donc augmenté.
- ➔ L'essai de stabilisation et du dosage en chaux nous a donné la courbe montrant la variation de l'optimum Proctor, la variation de la courbe CBR et les résultats numériques.

V. 3. 1. Variation de la courbe Proctor :

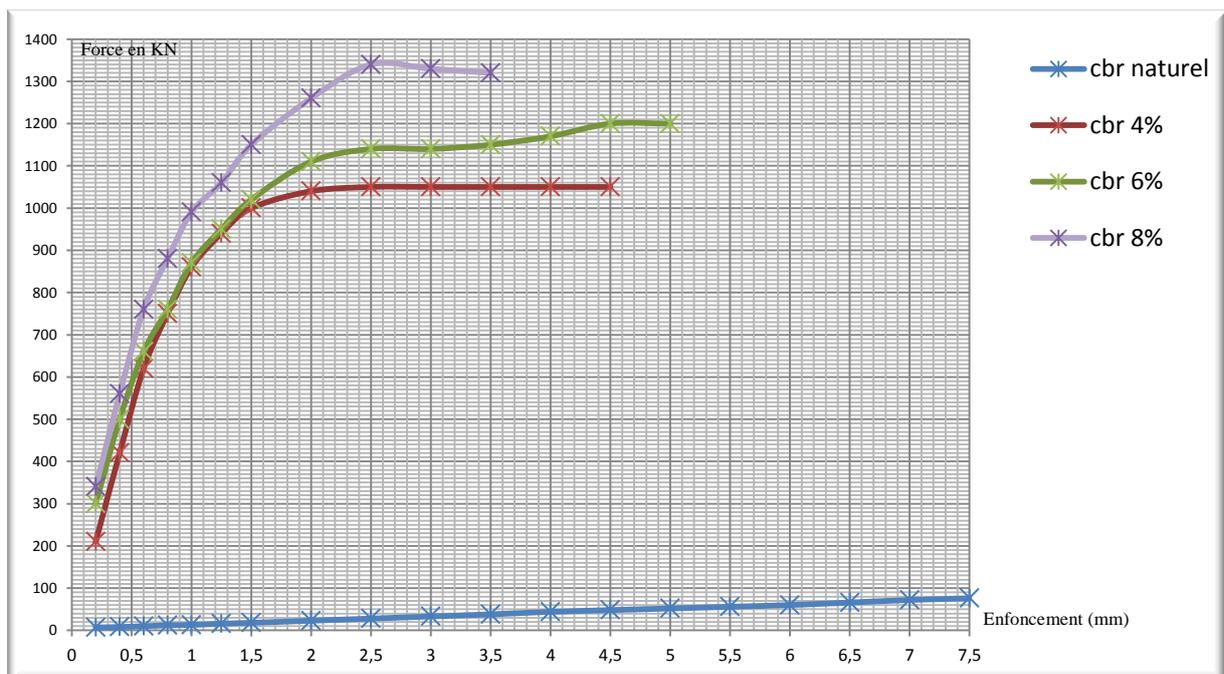
On peut observer dans la courbe Proctor (*Courbe 6*) l'évolution de notre sol selon son dosage.



Courbe 6 : Variation de la courbe Proctor

La courbe s'aplatit au fur et à mesure que le dosage augmente, cela s'explique par le fait que la densité maximale à l'optimum Proctor diminue et que la teneur en eau optimum augmente, la chaux agit donc sur la compacité du sol. La courbe va progressivement vers une teneur en eau croissante et une densité décroissante.

V. 3. 2. Variation de la courbe CBR :



Courbe 7 : Variation de la courbe CBR

- ➔ Il y a une différence notable entre la portance du sol naturel et celle du sol stabilisé à 4 %, l'ajout de la chaux augmente considérablement la portance du sol ;
- ➔ mais pour les trois dosages en chaux la variation est assez faible ;
- ➔ on remarque qu'arrivées à une certaine valeur de la force de pression, le sol stabilisé est cisailé, on arrête le poinçonnement à cet endroit, le matériau ne peut supporter une charge supérieure à la charge correspondant à cet endroit.

V. 3. 3. Résultats :

Tableau 17 : Résultat des essais de stabilisation à la chaux

Sol	Quantité de chaux ajoutée (g)	Masse d'eau ajoutée (g)	Indice de compacité I_c	Indice de portance CBR I_p CBR	Gonflement relatif (%)	Teneur en eau optimum (%)	Densité maximum (KN/m ³)
Sol naturel	-	590	94	3	1,45 %	12,2	19,6
Sol stabilisé à 4 %	240	610	94,2	78	0,31	13,1	19,5
Sol stabilisé à 6 %	360	670	94,7	84	0,31	13,5	19,3
Sol stabilisé à 8 %	480	690	94,9	99	0,15	14	19,2

Source : Auteur

- ➔ À un dosage en chaux de 4 %, l'indice CBR a déjà augmenté de 26 fois la valeur de l' I_p CBR naturel du sol ;
- ➔ au fur et à mesure que le dosage en chaux augmente, les paramètres de mesures augmentent aussi de façon positive ;
- ➔ le gonflement relatif du sol diminue.

V. 4. Interprétation des résultats :

Nous pouvons en déduire à partir des constatations, des courbes et des résultats des essais précédents que notre sol **répond favorablement au traitement**.

Il reste donc de choisir le dosage adéquat pour stabiliser notre couche de forme, les paramètres techniques et économiques entrent en jeu :

- pour une utilisation en couche de forme, même si le dosage en chaux de 4 % a déjà montré des résultats considérables, elle peut être utilisée en couche de fondation mais sa portance est encore insuffisante pour une utilisation en couche de base (CBR=78 < 80) ;
- avec le dosage en chaux de 8 %, nous avons obtenu une valeur CBR de 99, cette valeur a largement dépassé ce que nous attendions, le surdosage en chaux serait trop coûteux et superflu ;
- le dosage en chaux de 6 % a donné une valeur CBR de 84 qui est supérieur à la valeur minimale à utiliser en couche de forme.

Nous opterons donc pour une stabilisation du sol avec un dosage en chaux de 6 % pour pouvoir obtenir un indice CBR de 84 et pour une utilisation en couche de base tout en respectant les paramètres décrits dans le tableau suivant durant sa mise en œuvre :

Tableau 18 : Dosage et paramètre choisi pour une utilisation en couche de base

Sol	Quantité de chaux ajoutée (g)	Masse d'eau ajoutée (g)	Indice de compacité Ic	Indice CBR Ic CBR	Teneur en eau optimum (%)	Densité maximum (KN/m ³)
Sol stabilisé à 6 %	360	670	94,6	84	13,5	19,3

Source : Auteur

Avec un poids volumique apparent de 19,0 KN/m³, c'est-à-dire une densité apparente de 1900 Kg/m³, la quantité de chaux nécessaire au m³ pour un dosage en chaux de 6 % est de 114Kg.



CONCLUSION PARTIELLE

D'après les différents essais effectués au laboratoire, nous pouvons conclure que notre sol est un sol argileux de faible portance mais qui présente toutefois un gonflement assez faible, et que le matériau répond favorablement au traitement à la chaux. L'essai de dosage nous a permis de déterminer un dosage en chaux optimum pour la stabilisation de 6 %. Toutefois, pour obtenir les caractéristiques du matériau traité sur terrain, il faut bien suivre les prescriptions requises, les techniques de mise en œuvre décrites dans la partie précédente et s'assurer lors du compactage du bombement géométrique de la route.



PARTIE 3. ÉVALUATION DU PROJET



Dans la partie précédente, nous avons vu que la stabilisation à la chaux est techniquement favorable. Mais l'évaluation d'un projet ne se fait pas uniquement du côté technique, il y a aussi les côtés économiques, mises en œuvres et environnementales. Nous allons donc étudier de près ces trois derniers points.

Pour se faire, il faudrait tout d'abord avoir un paramètre d'évaluation, c'est-à-dire dimensionner notre route pour connaître la quantité de matériau à utiliser et les différents travaux à effectuer sur la chaussée. Rappelons que notre étude se limite sur la chaussée, pour les accotements et les ouvrages hydrauliques (assainissement et franchissement), c'est tout une autre étude.

Si le matériau n'est pas traité, l'apport de matériaux ayant les spécifications requises est nécessaire, le plus couramment utilisé est le Matériau sélectionné (MS) nous comparerons donc la stabilisation avec cette technique.

Cette troisième partie comportera donc :

- le dimensionnement de la chaussée ;
- la comparaison de la stabilisation de la chaussée avec l'apport de MS ;
- une évaluation économique ;
- et enfin une évaluation environnementale.

CHAPITRE 1. DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUSSEE

I. 1. Trafic [8]:

I. 1. 1. Généralités :

Le trafic est le nombre de véhicules circulant sur une route pendant une période donnée (généralement pendant un jour).

Il joue un rôle important lors de la conception de la chaussée du fait qu'il permet à la fois de déterminer la structure de la chaussée, de dimensionner la route et éventuellement de fixer les matériaux de la couche de roulement.

L'étude de trafic comporte :

- Le trafic passé ;
- Le trafic actuel ;
- Le trafic futur.

I. 1. 2. Taux d'accroissement du trafic :

Il est obtenu par la formule suivante :

$$i = \frac{100}{n} \times \left[\frac{T_n}{T_0} - 1 \right]$$

Où :

- ➔ T_n : trafic à l'année d'étude n (trafic actuel) ;
- ➔ T_0 : trafic à l'année de statistique (trafic passée) ;
- ➔ n : nb d'années écoulées entre T_0 et T_n .

Mais si le trafic passé ne peut pas être déterminé, le taux d'accroissement moyen qui est utilisé pour les routes à Madagascar qui est de 6 % peut être utilisé. En tenant compte de l'évolution future de l'usage de notre route, nous prenons la valeur du taux de croissance annuelle du trafic à 6 %.

I. 1. 3. Comptage :

Le comptage du trafic actuel doit tenir compte de la répartition des véhicules selon leur poids, leurs nombres, les dispositions de leurs essieux et leur catégorie.

Pour le cas de la route d'Antsakoamaro, cette route est uniquement à usage minier et pour le transport de charbons, ce sont généralement les camions et les engins qui circulent sur cette voie. Le comptage effectué a donné le résultat suivant :

- ➔ TMJ : 20 Véhicules/jour ;
- ➔ MJA : **N = 17** Véhicules/jour ;

Où :

- ★ TMJ : est le Trafic Moyen Journalier pour toutes catégories de véhicules (utilisés pour la méthode de dimensionnement CEBTP) ;
- ★ MJA : Moyenne Journalière Annuelle des poids lourds ou PL (utilisé pour la méthode LCPC et LNTPB) correspondant au nombre de poids lourds supérieurs à 30KN ou 3 tonnes/jour où nombre de poids lourd de poids total en charge (PTC) supérieure à 3T.

I. 1. 4. Prévision du trafic cumulé de poids lourds pendant la durée de service :

C'est le nombre cumulé en nombre d'essieu standard de poids lourds à deux essieux qui est symbolisée par la lettre N_e . Si ce trafic est supérieur à 250 000 essieux standard, la chaussée en terre devra subir un changement de structure c'est-à-dire qu'elle devra, soit être rechargée, soit être revêtue.

Sa formule est donné par :

$$N_e = N \times A \times n \times C$$

Avec :

- ➔ N : trafic moyen journalier en nombre de poids lourds à l'année de mise en service $t=100$;
- ➔ n : durée de service en nombre d'années (**5ans** pour les Routes Non Revêtues) ;
- ➔ A : agressivité des poids lourds (pour des matériaux traités à la chaux et aux liants hydrauliques $A = 0,8$ pour des trafics faibles et moyens);
- ➔ C : facteur de cumul qui est donné par l'expression :

$$C = 365 \times \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{n \times i} \right]$$

- ★ n étant la durée de service en nombre d'années ;
- ★ et i le taux de croissance du trafic (%) ;

★ nous avons donc : $C = 365 \times \left[\frac{(1+0.06)^5 - 1}{5 \times 0.06} \right]$ $C = 411,51$

D'où le nombre cumulé du trafic futur de la route :

$$Ne = 17 \times 0,8 \times 5 \times 411.51 = Ne = 27\,983 \text{ essieux standards}$$

Ne = 27 983 essieux standards < 250 000 essieux équivalents, donc nous n'avons pas besoin de renforcement ni de revêtement, notre choix de stabiliser uniquement la chaussée sans renforcement (c'est-à-dire sans modification de la structure de la route) est vérifié.

Nous étudierons donc dans le paragraphe suivant le dimensionnement de la chaussée pour une route en terre.

I. 2. Dimensionnement [8]:

I. 2. 1. Méthodes de dimensionnement :

Le dimensionnement des chaussées non revêtues consiste à déterminer l'épaisseur de la couche de roulement.

Il existe deux méthodes de dimensionnement de la couche de roulement des Routes en Terres :

- ➔ La méthode CBR ;
- ➔ La méthode du RRL.

I. 2. 2. Méthode CBR à partir de la formule de PELTIER :

L'épaisseur de la couche de roulement de la chaussée est donné par la formule :

$$e_{CR} = e_{calculée} + e_{usure}$$

Avec :

- ➔ e_{CR} : épaisseur de la couche de roulement (cm);
- ➔ $e_{calculée}$: épaisseur de la couche de roulement obtenu par calcul (cm) ;
- ➔ e_{usure} : épaisseur d'usure de la couche de roulement pendant sa durée de vie (cm).

II. 2. 2. 1. Épaisseur calculée :

$$e_{calculée} = \frac{100 + \left(75 + 50 \log \frac{N}{10}\right) \sqrt{P}}{CBR \text{ corrigé} + 5}$$

Où :

- ➔ N : nombre de Poids Lourds (PL) de Poids Total en Charge (PTC) supérieur à 3T/j ;
- ➔ P : poids maximal d'une roue que peut supporter une route en terre :

P correspond aux voitures appartenant aux systèmes de charges Bc conformément aux programmes de charges et épreuves des ponts et routes.

- ★ Pour une RN : Bc = 25T et P = 5T ;
- ★ et pour une RIP : Bc = 15T et P = 5T.

- ➔ CBR corrigé est donné par la formule :

$$CBR \text{ corrigé} = \frac{CBR_{4j}}{0.7}$$

Avec :

CBR_{4j} : CBR à 4 jours d'immersion.

II. 2. 2. 2. Épaisseur d'usure :

Pour prévenir l'usure de la couche de roulement durant sa durée de vie, il est nécessaire d'ajouter une épaisseur d'usure qui se calcule par :

$$e_{usure} = usure \text{ annuelle} \times durée \text{ de vie}$$

L'usure annuelle des routes non revêtues est donnée par le tableau suivant :

Tableau 19 : Usure annuelle des routes non revêtues.

Trafic PL (V/j)	Usure annuelle
10 – 30	1cm
30 – 100	2cm
100 – 300	3cm

Source : Cours Route II BTP ESPA [8]

II. 2. 2. 3. Épaisseur de la couche de roulement e_{CR} :

$$e_{CR} = e_{Calculée} + e_{usure}$$

I. 2. 3. Méthode du Road Research Laboratory (RRL):

L'épaisseur de la couche de roulement est donnée par la formule :

$$e_{CR} = e_{abaque} + e_{usure}$$

Où :

- ➔ e_{abaque} : épaisseur de la couche de roulement déterminé à partir de l'abaque (en cm);
- ➔ e_{usure} : épaisseur d'usure déterminée de la même façon que la méthode CBR (en cm).

Obtention de e_{abaque} :

L'épaisseur de cette couche est déterminée à partir des Abaques de dimensionnement du RRL (Annexe N°8) qui est fonction du CBR corrigé du sol support et de l'intensité du trafic.

L'intensité du trafic est classée en 5 catégories selon le tableau suivant :

Tableau 20 : Catégories du trafic

Classe	Nombre de PL de PTC $\geq 3T/j$
A	0 – 15
B	15 – 45
C	45 – 150
D	150 – 450
E	450 - 1500

Source : Cours Route II BTP ESPA [8].

I. 3. Épaisseur de la chaussée selon le matériau utilisée:

I. 3. 1. Matériau stabilisé à la chaux :

I. 3. 1. 1. Méthode CBR à partir de la formule de PELTIER :

Nous avons obtenu un dosage en chaux à 6% avec CBR égal à 84 lors de l'essai en laboratoire, d'où un CBR corrigé de 120.

En appliquant la formule de Peltier, l'épaisseur calculée est $e_{calculée} = 2,35 \text{ cm}$.

Pour $N=17$ véhicules et $n = 5$ ans, nous lisons dans le *Tableau 19* que l'usure annuelle de notre route est de 1cm pour obtenir :

$$e_{usure} = 5 \text{ cm}$$

et nous avons une usure de couche de roulement qui est égal à $e_{CR} = e_{calculée} + e_{usure}$

$$e_{CR} = 7,35 \text{ cm}$$

I. 3. 1. 2. Méthode du Road Research Laboratory (RRL):

Avec un nombre de trafic $N=17$ véhicules par jour, le *Tableau 20* nous montre que notre tronçon se trouve dans la classe de courbe B.

L'abaque du Road Research Laboratory (*Annexe N°8*) a donné: $e_{abaque} = 7 \text{ cm}$

Même méthode de détermination que la précédente, l'épaisseur d'usure est de 5cm.

Nous avons donc :

$$e_{CR} = 12 \text{ cm}$$

Comme $e_{CR} = \max\{\text{méthode CBR}, \text{méthode RRL}\} = \max\{7,35 \text{ et } 12\}$, nous prendrons l'épaisseur de la couche à stabiliser calculée à partir de la méthode du RRL :

$$\underline{e_{CR} = 12 \text{ cm}}$$

Mais pour une bonne mise en œuvre et par règle de l'art, l'épaisseur minimum d'une couche à stabiliser est de **15cm**, nous prendrons donc cette valeur pour le calcul de la quantité de matériaux.

I. 3. 2. Épaisseur de la chaussée avec un matériau sélectionné :

Nous allons utiliser un gîte qui a été employé par le MTP (MTPM actuel) lors de la réhabilitation de la RN6. Le matériau sélectionné utilisé se trouve dans le gîte situé à une distance de 5,800Km du PK 0 du projet.

Les spécifications techniques du gîte sont résumées dans le *Tableau 21*. Comme nous le voyons dans ce tableau, le matériau est d'assez faible portance, cela s'explique par le fait que les sols aux alentours Ambondromamy sont généralement de faible portance.

Tableau 21 : Caractéristiques du gîte

Localisation on PK	Caractéristiques naturelles						Nature	Accès
	γd_{max} KN/m ³	W _{OPM} %	W _L %	I _p %	%F %	I _{CBR}		
PK 8+800 Km de la RN6 CG Soit 5,8Km du PK 0+ 000 du projet suivant la RN	19,79	11,8	39,9	14,1	48	26	Sable argileux rougeâtre	à 1,7Km de la route Nationale, donc à une distance de 7,5Km du projet.

Source : MTPM

En suivant la même méthode de calcul de dimensionnement (méthode CBR et méthode RRL) et en tenant compte de l'indice CBR du matériau sélectionné ($I_{CBR} = 26$), nous obtenons :

$$\underline{e_{CR} = 17,5 \text{ cm}}$$

CHAPITRE 2. COMPARAISON DE LA STABILISATION AVEC DU MATÉRIAU SÉLECTIONNÉ

II. 1. Technique de mise en œuvre :

Nous avons vu dans la partie bibliographie les différentes étapes pour la mise en œuvre de la stabilisation à la chaux, toutefois pour comparer avec l'apport de MS, nous avons résumé la technique de mise en œuvre dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Comparaison de la technique de mise en œuvre

Matériau	Sol stabilisé à la chaux	Matériau sélectionné
Technique de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none">• le décapage ;• la scarification ;• l'épandage de la chaux;• l'arrosage ou aération ;• le malaxage ;• le réglage ;• le compactage ;• cure.	<ul style="list-style-type: none">• un décapage ;• une scarification ;• Transport du matériau ;• l'épandage de matériau MS ;• l'arrosage ;• le malaxage ;• le réglage ;• et le compactage.

Source : Auteur

L'apport de matériau sélectionné est moins avantageux lors de la mise en œuvre car le transport de matériaux entraîne une perte de temps considérable surtout lorsque le gîte se trouve à une distance assez éloignée ;

Par contre, après la mise en œuvre, la stabilisation à la chaux nécessite une cure après sa mise en œuvre pour éviter l'assèchement brusque du liant qui pourrait provoquer un retrait brusque ou des fissures. La cure consiste à arroser régulièrement le matériau avec une quantité d'eau adéquate.

Pour un éventuel Entretien de la chaussée, le sol stabilisé est plus résistant, il peut supporter de lourdes charges par rapport au MS grâce à ses propriétés géotechniques élevées, le processus de dégradation du sol-chaux est donc plus lent.

II. 2. Coût:

Le coût total des travaux comprend la chaussée, les ouvrages d'assainissements, les ouvrages hydrauliques, les accotements, etc. bref tout ce qui constitue une route. Dans ce paragraphe, nous étudierons uniquement le coût des matériaux constituant la chaussée, puisque c'est le domaine de notre étude.

II. 2. 1. But :

L'évaluation du coût nous donne une idée sur l'intérêt que peut apporter l'utilisation de la stabilisation à la chaux. Pour cela, nous comparerons cette méthode avec l'apport de Matériau sélectionné.

II. 2. 2. Comparaison des coûts de construction :

II. 2. 2. 1. 1^{ère} variante : stabilisation à la chaux :

a. Quantité :

Nous envisageons de stabiliser un tronçon de route 5,000 Km, la chaussée (sans accotement) a une largeur de 4,5m, la couche à stabiliser est constituée de 15cm d'Argile limoneuse. L'étude en laboratoire nous a donné le dosage en chaux adéquat qui est de 6% en poids de matériau stabilisé.

Les données dont nous avons besoin pour le calcul de la quantité de matériaux sont :

- ➔ masse volumique du sol naturel 19,0KN/m³;
- ➔ coefficient de foisonnement du sol $f = 1,35$;
- ➔ coût de la chaux 300Ar;
- ➔ coût du sol 0Ar.

Tableau 23 : Devis quantitatif du sol stabilisé

désignation	formule	Unité	mise au net
surface totale de la route S	$S = L \times l$	m ²	22500
volume totale de la route V (volume compactée)	$V = S \times e$	m ³	3375
volume foisonnée du matériau Vf	$V_f = V \times f$	m ³	4556
masse de matériau Msol	$M_{sol} = (\gamma_d / V_f) / g$	Kg	8656875
masse du liant Mc	$M_c = M_{sol} \times 6\%$	Kg	519413

Source : Auteur

b. Coût :

Il n'y a aucune dépense pour l'argile limoneuse à stabiliser car on emploie le matériau in-situ, le cout de la stabilisation de la chaussée sera donc uniquement évalué sur le cout de la chaux, le cout de transport sur chantier est déjà inclus dans le prix de la chaux.

Tableau 24: Coût de la chaux

Désignation	Prix unitaire	Quantité	Montant en Ar	Prix par Km
Unité	Ar	Kg	Ar	Ar
Chaux	300,00	519413	155 823 750,00	31 164 750,00

Source : Auteur

II. 2. 2. 2. 2^{ème} variante : Apport de MS :

a. Quantité :

Comme précédemment, nous envisageons d'Entretenir la chaussée sur un tronçon de route mesurant 5,000 Km. L'apport de Matériau Sélectionné est évalué au m³, nous calculerons uniquement le volume foisonné du matériau. Nous avons :

- ➔ largeur de la chaussée l = 3,5m ;
- ➔ longueur de la chaussée L = 5000m ;
- ➔ coefficient de foisonnement f= 1,2 ;
- ➔ épaisseur de la couche de roulement e_{CR} = 17,5 cm.

Tableau 25 : Devis quantitatif du matériau sélectionné

Désignation	Formule	Unité	Mise au net
Surface totale de la route S	$S = L \times l$	m ²	22500
Volume total de la route V (volume compacté)	$V = S \times e$	m ³	3938
Volume foisonnée du matériau Vf	$Vf = V \times f$	m ³	4725

Source : Auteur

b. Coût :

Nous résumons dans le tableau suivant le cout total et le coût au Km de l'apport de MS :

Tableau 26 : Coût du MS

Désignation	Prix unitaire	Quantité	Montant en Ar	Prix par Km
Unité	Ar	m ³	Ar	Ar
MS	38 290,00*	4725	180 920 250,00	36 184 050,00

Source : Auteur

*le sous détail de prix du MS est donné en *Annexe N°9*.

II. 2. 2. 3. Évaluation du coût :

- ➔ Le coût de la stabilisation à la chaux est largement moins cher car il présente un **avantage de 5 019 300,00 Ar/ Km de chaussée par rapport au coût de MS ;**
- ➔ la stabilisation entraine une **économie de 25 096 500 Ar ou 125 482 500 Fmg par rapport à l'apport de MS pour une route de 5Km.**



CHAPITRE 3. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTALE

Après avoir vu les avantages de l'utilisation de la chaux du point de vue coût et technique, nous allons voir dans ce chapitre quel serait l'impact de la stabilisation de la route sur le plan socio-économique et environnemental.

III. 1. Socio-économique :

Nous mesurons ici l'impact pendant et après la mise en œuvre de la chaussée :

- ➔ création d'emploi pour les villageois pour la main d'œuvre durant la mise en œuvre de la route ;
- ➔ amélioration de l'accessibilité aux sites d'exploitation miniers et aux alentours ;
- ➔ amélioration du confort et sécurité des usagers de la route ;
- ➔ gain de temps durant le parcours de la route ;
- ➔ création de l'emploi pour l'optimisation éventuelle de l'exploitation minière et l'ouverture éventuelle d'autres exploitations dans la zone ;
- ➔ augmentation du niveau de service de la route ;
- ➔ valorisation des produits locaux que ce soit minier ou autres ;
- ➔ augmentation des sources de revenus de la Commune grâce à l'augmentation des produits qui y sont exportées génèrent des taxes.

III. 2. Environnementale :

L'objectif général d'une EIE ou étude d'impact environnementale c'est de prédire et anticiper les impacts que peut générer un projet sur l'environnement afin de préconiser des mesures environnementales du projet.

III. 2. 1. Impact positif :

- ➔ l'utilisation de la chaux et du sol en place épargne la dégradation du terrain d'emprunt;
- ➔ il n'y a pas de pollution causée par des matériaux ou d'autres déchets ;
- ➔ aucune dégradation du paysage original ;
- ➔ le sol-chaux est recyclable.

III. 2. 2. Impact négatif :

- ➔ la production de la chaux consomme beaucoup de combustibles ce qui entraîne une déforestation ;
- ➔ pollution des sols : Les sols pourront également être pollués par les déchets de chantiers et de base de vie : lubrifiants, hydrocarbures, déchets solides inertes, déchets organiques, etc. ;
- ➔ pollution des eaux superficielles : les eaux superficielles circulant à proximité des chantiers, de base de vie, zones d'emprunt ou carrières pourront être souillées par divers déchets et rejets issus des travaux : huiles usagées, hydrocarbures, détergents, etc ;
- ➔ blessures et traumatismes : La circulation des engins et des véhicules de chantier, les excavations d'emprunts et les dépôts de matériaux sur l'emprise augmenteront le risque d'accident parmi les personnes transportées le long des axes en travaux ;
- ➔ maladies liées à l'air : la poussière soulevée pourra occasionner de légers problèmes de santé (respiratoire est oculaires) chez les populations résidentes et au niveau des villages traversés. Les émanations dues à la réaction de la chaux avec le sol seront surtout ressenties par les travailleurs.

III. 2. 3. Mesure d'atténuation :

La stabilisation à la chaux présente à la fois des impacts positives et négatives. Mais, pour les impacts négatifs causés par cette opération, il existe des mesures d'atténuations adéquates pour réduire considérablement ces effets :

- mise en place d'un programme de reboisement pour remplacer les bois détruits et pour assurer l'approvisionnement en combustible de la production de la chaux ;
- respect des règles de sécurité du travail ;
- les prélèvements d'eau par les entreprises devraient se faire principalement dans les cours d'eau permanent sans compromettre les ressources disponibles actuellement par les villageois. Les excavations créées au niveau des zones d'emprunt pourront éventuellement se remplir d'eau pendant la saison pluvieuse et constituer ainsi des réserves temporaires d'eau à usage agricole ou domestique. Les forages éventuellement créés pour les besoins de base de vie pourront être ensuite mis à profit par les populations riveraines ;
- sensibilisation du personnel à la protection de l'environnement ;



- mise en place des signalisations et panneaux de chantiers ;
- port de masque de sécurité lors de la mise en œuvre de la chaux ;
- gestions des polluants liquides et déchet solides ;
- gestion des matériaux non utilisés.



CONCLUSION PARTIELLE

Les différents modes d'évaluations nous ont permis de voir que la stabilisation est largement plus économique par rapport au matériau sélectionné par la qualité de ses propriétés mécanique, son faible coût par rapport au MS, et aussi son impact socio-environnemental qui est moindre même si la technique de mise en œuvre des deux méthodes est plus ou moins similaire.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Les différentes contraintes, à savoir : l'épuisement, le coût et l'éloignement, des matériaux de constructions routiers nous ont poussés à mener des études sur les matériaux de constructions routières. En effet notre recherche consiste à la valorisation des matériaux en place.

Notre choix s'est porté sur la route nommée « Route Zafy Albert » située dans la commune d'Ambondromamy, qui est généralement à usage minier. Vu qu'il y a un gisement de chaux assez important dans la région de Boeny, nous avons étudié la stabilisation à la chaux de cette route. Cela a pu être réalisé, premièrement grâce à une étude sur terrain, mais surtout grâce à une étude bibliographique et une étude en laboratoire.

L'étude sur terrain nous a permis de voir réellement l'état de la route, à prélever des échantillons pour l'essai en laboratoire et de collecter les différentes données qui pourraient être utiles.

L'étude bibliographique nous a montré les effets que la mauvaise portance d'un sol routier pourrait avoir sur la route. Il n'y a pas de formule toute faite pour stabiliser sur place un sol routier, car il existe une multitude de types de sols. La stabilisation routière à la chaux nécessite une étude en laboratoire approfondie qui consiste à identifier le sol et la chaux, de voir l'aptitude au traitement de la chaux et enfin de déterminer le dosage optimum pour la stabilisation. Toutefois il existe des spécifications et des normes à ne pas négliger.

Les essais expérimentaux nous ont permis l'identification et la caractérisation des différents matériaux. Nous avons pu obtenir que notre sol est de nature argilo-limoneuse ayant une portance CBR=3, ce qui est largement inférieure à la norme. La chaux qui est de la chaux éteinte, encore nommée chaux grasse. Le sol réagit bien au traitement, mais pour avoir un résultat optimum en qualité et en quantité, il faut un dosage en masse de 6% de chaux, c'est-à-dire 114kg de chaux par mètre cube de sol.

Économiquement et techniquement, la stabilisation à la chaux est plus avantageuse par rapport à l'apport de matériau sélectionné.



Bref, notre étude nous a permis de voir que la stabilisation à la chaux est un choix très intéressant car elle évite l'apport d'autres matériaux, augmente jusqu'à 23 fois la portance du sol, et qu'elle est aussi techniquement, économiquement et environnementalement réalisable. Elle pourrait contribuer favorablement au développement de la société concernée, de la commune, voir même la région car cette technique pourrait être utilisée dans d'autres cas similaires. Toutefois notre étude s'est limitée généralement dans le comportement immédiat de l'ensemble sol-chaux, afin de parfaire et compléter cette étude, une étude de comportement à long terme pourrait être envisagée.



RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Herimanantsoa Jocelyn Marie, Contribution à l'optimisation de l'exploitation du gypse dans la carrière d'Antsakoamaro – Ambondromamy, Sciences de la terre ASJA 2012
- [2] PCD Ambondromamy, 2010 ;
- [4] Tidiane Ibrahim DOUCOURE et Mamadou Doudou NDIA YE, Étude de substitution de la latérite en couche de base : sable-bitume et banco-coquillage, Mémoire de fins d'études 2008-2009 ;
- [5] M'bark FANCHA, Chef du Service Infrastructures à la DPE Chtouka Inezgane , Réflexions sur la gestion des routes en terre : typologie des routes en terre – Agadir ;
- [6] RAZAFIMAHATRATRA Francis Andriamampionona, Étude de stabilisation de sol : cas de la RN5 (Mahabo-Morondava), mémoire de fin d'études d'ingénieur ESPA, 2011 ;
- [7] Mme RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Caractérisation, étude du comportement mécanique et domaines d'applications des terres rouges des environs proches de la région d'Analamanga, Thèse de doctorat ESPA, 2013 ;
- [8] Mr RAKOTOZAFY Andrianirina, Cours Route II BTP Licence ESPA, 2009 ;
- [11] LINA Zizy Aimée, Étude comparative des différentes stabilisations de la latérite, mémoire de fin d'études d'ingénieur ESPA, 2008 ;
- [12] RABOTOVAO Oswald Marie Antonio, Étude comparative de la stabilisation des latérites avec les liants : ciment et silice active additionnée de l'urée, mémoire de fin d'études d'ingénieur ESPA, 2007 ;
- [13] RAKOTONDRAVALY Désiré Alphonse, Essai de fabrication de briques en terre stabilisée, à base de stabilisants routiers, cas de la latérite de Vontovorona, Mémoire de fins d'études DEA ESPA, 2003 ;
- [14] RAKOTONIRINA Jacques Arsène, Essai de stabilisation des routes en terre par l'utilisation d'émulsion polymère : cas de la latérite de Vontovorona, mémoire de fin d'études d'ingénieur ESPA, 2010 ;
- [15] Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide technique fascicule I et II, SETRA et LCPC, Juillet 2000, 2^{ème} édition ;
- [20] RABARIJOEL Samuel Olivier et RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Contribution à l'exploitation de la chaux à Madagascar « l'unité CGP Ambatondrazaka », mémoire de fin d'études DEA ESPA, 1998 ;



- [24] Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux, Service central technique division R.2 Juillet Madagascar 1974 ;
- [25] Recommandation du SETRA et du LCPC pour le traitement en place des sols fins à la chaux, E LEFLAIVE, 1972 ;
- [26] RAZAFIMAHATRATRA Francis Andriamampionona, Étude de stabilisation de sol : cas de la RN35 (Mahabo-Morondava), mémoire de fin d'étude d'ingénieur ESPA, 2011 ;
- [27] Quelques aspects théoriques et pratiques de la stabilisation des sols à la chaux, volume XVI N°3/1971 R.VAN GANSE ;
- [29] Analyse au laboratoire ESPA 2013.



WEBOGRAPHIE

- [3] www.wikipedia.com;
- [9] www.infociments.fr : le traitement des sols à la chaux et/ ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme, documentation technique, Septembre 2004 ;
- [10] www.iut-tice.ujf-grenoble.fr : les traitements de sols au ciment et à la chaux ;
- [16] www.scribd.com : Amélioration des sols, université de la Réunion, Natacha SERTIER 2005-2006 ;
- [17] www.moodle.insa-toulouse.fr : Géotechnique 1 cours –chapitres 1 Troisième année Ingénierie de la Construction, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Jacques Lérau 2005 – 2006 ;
- [18] Microsoft Encarta © 2009 ;
- [19] www.la-chaux.personeuf.fr : définition de la chaux ;
- [21] www.editions-eyrolles.com : Techniques et pratiques de la chaux, École d'Avignon, EYROLLES, Deuxième édition 2003 ;
- [22] www.scribd.com : Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, commission Européenne, mai 2010 ;
- [23] www.chauxflash.be : Chaux pour le traitement des sols ;
- [28] www.lms.epfl.ch : PR – 4 Quartage, Université de Lausanne, Centre d'Analyse Minérale, 2009 ;
- [30] www.infociments.fr : traitement des sols en place aux liants hydrauliques, CIM béton, Joseph ABDO.



NORMES

Granulométrie par tamisage NF P 94-056 ;
L'indice de plasticité Ip NF P 94-051 ;
Teneur en eau par étuvage NF P 94-050 ;
Classification des sols NF P 11 300 ;
Densité spécifique : NF P 94-054 ;
Densité apparente : NF P 94-064 ;
Essai Proctor : NF P 94-093 ;
Essai CBR NF P 94-078 ;
Essais sur la chaux NF EN 459-1 et 2.

LOGICIELS UTILISES

Microsoft Office;
SIG: Arcgis 9.3;
Photoshop;
Google Earth.



ANNEXES



ANNEXE N°1 : IDENTIFICATION CHIMIQUE ET PERTE AU FEU

1. Fusion alcaline :

- ➔ peser 0,5g d'échantillon et introduire dans un creuset en platine ;
- ➔ ajouter 4g de KNACO_3 et chauffer progressivement jusqu'à $975\pm 25^\circ\text{C}$ pendant 45min, ensuite poser ce dernier dans une capsule en porcelaine de 175ml ;
- ➔ commencer l'attaque en introduisant peu à peu 50ml de HCl 50% dans le creuset puis rincer à fond le creuset et son couvercle avec la même solution de HCl 50% tout en récupérant la solution d'attaque et de lavage dans le capsule en porcelaine, après le dégagement gazeux, rincer de nouveau le creuset avec un peu d'eau distillée chaude et placer la capsule sur un bain de sable ;
- ➔ évaporer à sec de manière à obtenir une poudre finement divisée ;
- ➔ enlever et laisser refroidir la capsule puis humecter uniformément la masse avec 50ml de HCl 10% et chauffer au bain de sable pendant 15min ;
- ➔ filtrer par décantation sur papier filtre moyen en recevant le filtrat dans une fiole jaugée de 500ml ;
- ➔ laver le précipité sur le filtre avec de l'eau distillée bouillante jusqu'à la disparition de la réaction avec AgNO_3 ;
- ➔ laisser refroidir le filtrat dans un bain d'eau froide puis ajuster au trait de jauge avec de l'eau distillée.

a. Détermination de la teneur en silice $\%\text{SiO}_2$:

Mettre le papier filtre et son contenu dans un creuset en platine et calciner à $1000^\circ\text{C}\pm 25^\circ\text{C}$ pendant 45minutes. La teneur en silice est obtenue en prélevant la masse avant et après cuisson du papier filtre.

Expression des résultats :

$$\%\text{SiO}_2 = (\text{M}' - \text{M}) \times 100$$

M : masse du creuset vide

M' : masse du creuset et son contenu après calcination.



b. Détermination des autres oxydes %Fe₂O₃, %Al₂O₃, %CaO, %MgO :

Détermination de l'oxyde de fer %Fe₂O₃ :

Pipeter 100ml de filtrat pour le verser dans un bécher de 600ml tout en ajoutant 200ml d'eau distillée. Ajouter ensuite quelques gouttes de NH₄OH 50% jusqu'au virage au bleu foncé et verser rapidement 20ml de HCl 0,1N + 15ml de solution tampon puis 15 à 20 gouttes d'acide salsylique (violet-noir).

Chauffer à 40-45°C pendant 1mn30s (ne pas dépasser 50°C), lorsque cette température est atteinte, titrer avec EDTA (ou **acide éthylène diamine tétra acétique**) jusqu'au virage jaune-paille en faisant la lecture du volume de l'EDTA versé sur la burette graduée.

NB : Réserver cette solution notée A pour la détermination de la teneur en Al₂O₃

Détermination de la teneur en alumine %Al₂O₃ :

Avec la solution A :

- ➔ ajouter :
 - quelques gouttes de CH₃CO₂NH₄ (coloration bleue) ;
 - 5ml de CH₃CO₂H ;
 - 3 gouttes de complexonate de cuivre ;
 - 10 gouttes de PAN (rose violacée) ;
- ➔ porter à ébullition la solution, tout en agitant ;
- ➔ titrer avec de l'EDTA jusqu'à la coloration jaune paille ;
- ➔ lire le volume V d'EDTA versé.

Détermination de la teneur en oxyde de calcium %CaO :

Pipetter 50ml de filtrat puis le verser dans un bécher de 600ml et ajouter 200ml d'eau distillée. Ajouter 2goutters d'hélianthine (coloration rose) puis quelques gouttes de NH₄OH 50% jusqu'à l'obtention de coloration jaune. Lorsque la coloration est obtenue, verser rapidement 20ml de triéthanolamine (TEA) 33% puis 40ml de NaOH 2N, du réactif de Paton et Reeder (rouge violet) et enfin titrer avec EDTA jusqu'à l'obtention de couleur bleue. Relever la valeur du volume de l'EDTA versé.

Détermination de la teneur en magnésium %MgO:

- ➔ pipetter 50ml de filtrat et le mettre dans un bécher de 600ml puis additionner 200ml d'eau distillée ;



- ➔ ajouter une goutte d'hélianthine (rose clair) puis quelques gouttes de NH_4OH 50% jusqu'à coloration jaune ;
- ➔ verser rapidement 30ml de triéthanolamine 33% ;
- ➔ ajouter 10ml de NH_4OH concentré et 6 gouttes d'indicateur de MgO (coloration rose) ;
- ➔ titrer avec de l'EDTA jusqu'au virage incolore, noter le volume versé V1

Expression des résultats :

Pour chaque oxyde, nous avons la formule

$$\% \text{ Oxyde} = V \times f_{\text{EDTA/ oxyde}}$$

V : volume d'EDTA versé pour le dosage de chaque oxyde

$f_{\text{EDTA/ oxyde}}$: facteur de l'EDTA pour chaque oxyde.

2. Perte au feu PF:

La perte au feu englobe l'eau de constitution des minéraux, les matières organiques, et les gaz carboniques des carbonates alcalino-terreux.

Sa sédimentation se fait par calcination de l'échantillon, la différence de poids avant et après calcination donne la valeur de la perte au feu.

Méthodologie :

Prélever un échantillon de masse 1,5g pour le mettre dans un creuset en platine et le mettre dans un four à $1000^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ pendant 30minutes.

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

m_1 : masse de la matière première étuvée à 105°C

m_2 : masse de la matière première portée à 1000°C dans un four après étuvage à 105°C .



ANNEXE N°2 : EXEMPLES DE CALCULS

1. Analyse granulométrique

a. Masse sèche totale de l'échantillon M_s :

La masse sèche est déterminée à partir de la masse totale humide M_h (g) et de la teneur en eau de l'échantillon.

$$M_s = \frac{M_h \times 100}{100 + w}$$

M_s = masse sèche totale de l'échantillon

M_h = masse humide

w = teneur en eau

b. Pourcentage refus cumulé :

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

Avec R_i : masse de refus cumulée

c. Pourcentage de passants cumulés :

$$\% \text{ passants cumulée} = 100 - \% \text{ refus cumulée}$$

d. Tableau de procès-verbal de l'essai :

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE (SOLS) (échantillon STG/01)				
Chantier: Antsakoamaro Ambondromamy		Échantillon: profondeur : 0,00/0,30m		Nature visuelle: Argile limoneux sableux jaunâtre
Module AFNOR "M"	Ouverture tamis en mm	ÉCHANTILLON N°: STG/01		
		Mh:	2362	g
		Ms :	2318	g
		Ms1:	1013,5	g
		Refus	%	%
		cumulée	Refus	Tamisât
		g	cumulée	cumulé
50	80			
49	63			
48	50			
47	40			
46	31,5			
44	20			
42	12,5	5,5	0,2	100
40	8	21,5	0,9	99
38	5	52,5	2,3	98
34	2	144	6,2	94
31	1	260	11,2	89
26	0,315	577	24,9	75
24	0,2	734	31,7	68
20	0,08	1007	43,4	57
Rn + Tn		1012,5		
(Rn + Tn)/MS1 %		99,90%		

2. Limites d'Atterberg :

Les PV des essais effectués sont donnés :

a. Limite de liquidité :

LIMITES D'ATTERBERG (échantillon 409/11)								
Chantier: Antsakoamaro Ambondromamy	Échantillon: profondeur 0,00/0,30m				Nature visuelle: Argile limoneux-sableux jaunâtre			
LIMITE DE LIQUIDITÉ WL								
Nombre de coups	17		24		28		34	
Tare N°	75	3	14	78	182	98	142	51
Masse tare (g)	16,4	13,8	14,7	13,5	16,2	13,2	14,2	13,6
Masse total humide(g)	22,4	18,9	21,1	19,4	23,2	20,2	21,3	20,4
Masse total sec(g)	20,8	17,5	19,4	17,8	21,3	18,3	19,4	18,6
Masse d'eau(g)	1,6	1,4	1,7	1,6	1,9	1,9	1,8	1,8
Masse matériau sec(g)	4,4	3,7	4,7	4,3	5,1	5,1	5,2	5,0
Teneur en eau W%	36,9	37,3	36,5	36,3	36,5	36,3	35,5	35,8
Teneur en eau moyenne Wmoy%	37,1		36,4		36,4		35,7	

b. Limite de plasticité :

LIMITE DE PLASTICITÉ Wp		
Tare N°	177	60
Masse tare(g)	14,0	16,7
Masse totale humide(g)	20,3	20,7
Masse totale sèche (g)	19,2	20,1
Masse d'eau(g)	1,0	0,6
Masse matériau sèche (g)	5,2	3,4
Teneur en eau W%	19,3	18,5
Teneur en eau moyenne Wmoy%	18,9	

c. Exemple de calcul :

Limite de liquidité W_L :

On calcule la teneur en eau moyenne correspondant à chaque nombre de coups de coupelle ;

$$W_i = \frac{M_{ei}}{M_{si}} \times 100$$

$$W_1 = \frac{1,63}{4,42} \times 100 = 36,9$$

$$W_2 = \frac{1,38}{3,7} \times 100 = 37,3$$

$$W_{moy} = \frac{W_1 + W_2}{2}$$

$$W_{moy} = \frac{36,9 + 37,3}{2} = 37,1\%$$

W_L correspond à la teneur en eau à 25 coups.

Limite de plasticité :

Même méthode de calcul que W_L

Indice de plasticité :

$$I_p = W_L - W_P$$

$$I_p = 37,1 - 18,9 = 17,4\%$$

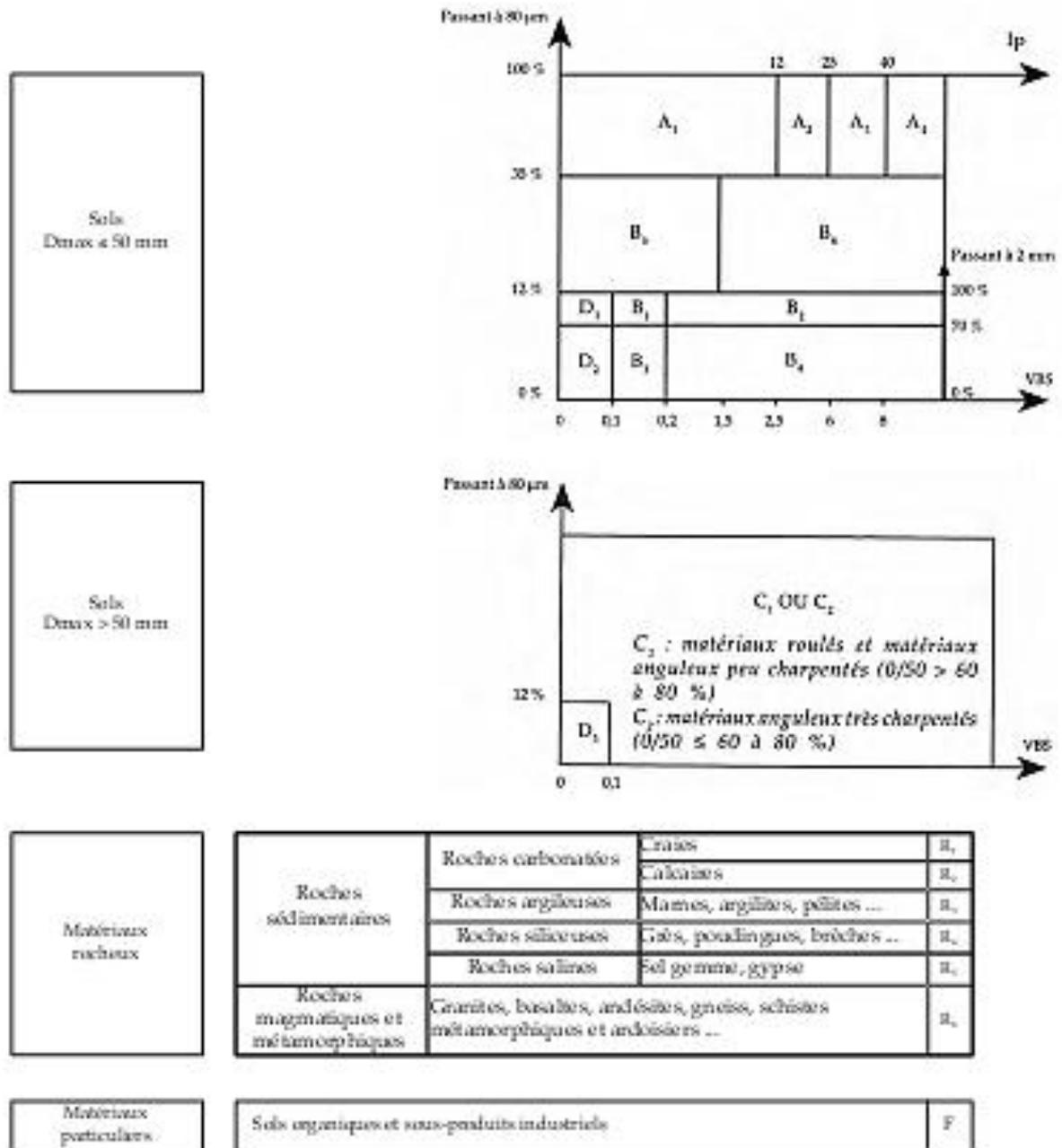
ANNEXE N°4 : CLASSIFICATION SELON LA MÉTHODE LPC :

Classification des sols (L.P.C.)

		$\alpha = 0,73 (W_L - 20)$								
CLASSIFICATION L.P.C.	Plus de 50% des éléments > 80 μ 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		$I_p > \alpha$		
	Plus de 50% des éléments > 80 μ ont un D \leq 2 mm	$C_u < 4$ ou $C_c < 1$ ou > 3	Gm	$I_p < \alpha$	Gm	GL	$I_p > \alpha$		GA	$W_L > 50$ $I_p < \alpha$
				$I_p > \alpha$	Gm	GA		$I_p > \alpha$	SA	
		$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	Sb	$I_p < \alpha$	Sb	SL	$I_p < \alpha$		SL	$W_L > 50$ $I_p < \alpha$
				$I_p > \alpha$	Sb	SA		$I_p > \alpha$	SA	
	$C_u < 6$ ou $C_c < 1$ ou > 3	Sm	$I_p < \alpha$	Sm	SL	$I_p > \alpha$	SA		$W_L > 50$ $I_p > \alpha$	
			$I_p > \alpha$	Sm	SA					
Tamisât à 80 μ		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 } Selon la granulométrie de la fraction grossière. C ₃ ou C ₁ }										

ANNEXE N°5: CLASSIFICATION SELON LA MÉTHODE GTR (MÉTHODE UTILISÉE POUR LA NORME NF P 11 300)

Tableau synoptique de la classification des matériaux selon leur nature



Pour les sols de classe A, nous avons :

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
paramètres de nature, premier niveau de classification	classe	paramètres de nature deuxième niveau de classification	sous-classe fonction de la nature	caractères principaux	paramètres et valeurs des seuils retenus	sous-classe
D_{max} ≤ 50μm et tamisât à 80μm > 35 %	A sols fins	VBS ≤ 2,5 ou IP ≤ 12	A1 Limos peu plastiques, loëss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur W _{nat} est proche de W _{OPN} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	IPI ≤ 3 ou wn ≥ 1,25 w_{OPN}	A1th
					3 < IPI ≤ 8 ou 1,10 W_{OPN} ≤ wn < 1,25 W_{OPN}	A1h
					8 < IPI ≤ 25 ou 0,90 W_{OPN} ≤ wn < 1,10 W_{OPN}	A1m
					0,70 W_{OPN} ≤ wn < 0,90 W_{OPN}	A1s
					wn < 0,70 W_{OPN}	A1ts
		12 < IP ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	IPI ≤ 2 ou Ic ≤ 0,9 ou wn ≥ 1,3 w_{OPN}	A2th
					2 < IPI ≤ 5 ou 0,9 < Ic ≤ 1,05 ou 1,1 W_{OPN} ≤ wn < 1,3 W_{OPN}	A2h
					5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 W_{OPN} ≤ wn < 1,1 W_{OPN}	A2m
					1,2 < Ic ≤ 1,4 ou 0,7 W_{OPN} ≤ wn < 0,9 W_{OPN}	A2s
					Ic > 1,4 ou wn < 0,7 w_{OPN}	A2ts
					25 < IP ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
		1 < IPI ≤ 3 ou 0,8 < Ic ≤ 1 ou 1,2 W_{OPN} ≤ wn < 1,4 W_{OPN}	A3h			
		3 < IPI ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou 0,9 W_{OPN} ≤ wn < 1,2 W_{OPN}	A3m			
		1,15 < Ic ≤ 1,3 ou 0,7 W_{OPN} ≤ wn < 0,9 W_{OPN}	A3s			
Ic > 1,3 ou wn < 0,7 W_{OPN}	A3ts					
IP > 40 ou VBS > 8	A4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	A4th		
				A4h		
				A4m		
				A4s		

Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

ANNEXE N°6 : ESSAI PROCTOR

1. Poids volumique humide :

$$\gamma_h = \frac{M_{hm} - M_m}{V_m} \times g$$

$$\gamma_h = \frac{8330,0 - 3548,0}{2287,6} \times 10 = 20,9 \text{KN/m}^3$$

2. Poids volumique sec :

$$\gamma_d = \frac{100 \times \gamma_h}{100 + w_{moy}}$$

$$\gamma_d = \frac{100 \times 20,90}{100 + 8,9} = 19,2 \text{KN/m}^3$$

3. Résultats :

ESSAI PROCTOR MODIFIE										
Chantier: Antsakoamaro Ambondromamy			Échantillon: profondeur 0,00/0,30m				Nature visuelle: Argile limoneux-sableux jaunâtre			
MOULE CBR		Teneur en eau naturelle W: 1,9 %			Poids total : 6000,0g Poids refus à 20mm module AFNOR N°44: 0,0g % Refus : 0,0%					
POINT N°		1		2		3				
TENEUR EN EAU	Tare N°	A8	F	A6	22	14	12			
	Poids tare (g)	30	28,5	32,5	29	28	31			
	Poids total humide+ tare(g)	321,5	319,0	328,0	331,5	313,0	314,0			
	Poids total sèche+tare(g)	298,0	295,0	298,5	300,5	279,5	281,0			
	Poids d'eau(g)	23,5	24,0	29,5	31,0	33,5	33,0			
	Poids matériau sec(g)	268,0	266,5	266,0	271,5	251,5	250,0			
	Teneur en eau W%	8,8%	9,0%	11,1%	11,4%	13,3%	13,2%			
	Teneur en eau moyenne W _{moy} %	8,9%		11,3%		13,3%				
POIDS D'EAU AJOUTÉE (g)		440		560		680				
POIDS VOLUMIQUES	N° Moule	P2		P2		P2				
	Poids du moule	3548,0		3548,0		3548,0				
	Poids matériau humide + moule	8330,0		8512,0		8536,0				
	Poids matériau humide	4782,0		4964,0		4988,0				
	volume du moule	2287,6		2287,6		2287,6				
	Poids volumique humide	20,9		21,7		21,8				
	Poids volumique sec	19,2		19,5		19,2				

ANNEXE N°7 : ESSAI DE PORTANCE

1. CBR à 0jour :

ESSAI CBR à 0 jour (échantillon STG/01)			
Chantier: Antsakoamaro Ambondromamy	Échantillon: profondeur 0,00/0,30m	Nature visuelle: Argile limoneux-sableux jaunâtre	
RÉSULTATS DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIÉ			
γ_d opt (KN/m ³)	19,6	$W_{opt}(\%) =$ 12,2	
Teneur en eau	Numéro des éch		
	Tare N°	1	3
	Masse tare (g)	31,5	30,0
	Masse totale humide+ tare(g)	322,5	320,3
	Masse totale sèche+tare(g)	316,5	314,5
	Masse d'eau(g)	6,0	5,8
	Masse matériau sèche (g)	285,0	284,5
	Teneur en eau W%	2,1	2,0
Teneur en eau moyenne W_i %		2,1	
Poids d'eau ajoutée	Énergie		
	25 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$		
	10,1		
	Poids humide de l'échantillon		
6000,0			
Poids sec			
5877,0			
Poids d'eau ajoutée			
594,0			
Teneur en eau de compactage	Tare N°	30,0	26,0
	Masse tare (g)	31,0	33,0
	Masse totale humide+ tare(g)	319,0	323,5
	Masse totale sèche+tare(g)	289,5	293,0
	Masse d'eau(g)	29,5	30,5
	Masse matériau sèche (g)	258,5	260,0
	Teneur en eau W%	11,4	11,7
	Teneur en eau moyenne W_{moy} %		11,6
Caractéristiques	N° Moule		
	33,0		
	Masse du moule		
	3464,0		
	Masse matériau humide + moule		
	8125,0		
	Masse matériau humide		
	4661,0		
volume de l'échantillon			
2250,8			
Teneur en eau moyenne W%			
11,6			
Poids volumique humide			
20,7			
Poids volumique sec γ_d			
18,6			
Indice de compacité $I_c = (\gamma_d/\gamma_{opt}) * 100$		94,7	

2. CBR à 4 jours d'immersion :

➔ Le résultat est recueilli sous forme de tableau comme suit :

ESSAIS APRÈS 96 HEURES D'IMBIBITION						
Chantier: Antsakoamaro Ambondromamy			Échantillon: profondeur 0,00/0,30m		Nature visuelle: Argile limoneux-sableux jaunâtre	
Teneur en eau avant compactage	Numéro des éch		1			
	Tare N°		1	3		
	Poids tare (g)		31,5	30,0		
	Poids total humide+ tare(g)		322,5	320,3		
	Poids total sèche+tare(g)		316,5	314,5		
	Poids d'eau(g)		6,0	5,8		
	Poids matériau sec(g)		285,0	284,5		
	Teneur en eau W%		2,1	2,0		
Teneur en eau moyenne Wi %			2,1			
Poids d'eau à ajouter	Énergie		10 coups		25 Coups	
	ΔW= Wopt - Wi				10,1	
	Poids humide de l'échantillon				6000,0	
	Poids sec				5877,0	
Poids d'eau ajoutée				594,0		
Teneur en eau de compactage	Tare N°		30,0	26,0		
	Poids tare (g)		31,0	33,0		
	Poids total humide+ tare(g)		319,0	323,5		
	Poids total sèche+tare(g)		289,5	293,0		
	Poids d'eau(g)		29,5	30,5		
	Poids matériau sec(g)		258,5	260,0		
	Teneur en eau W%		11,4	11,7		
	Teneur en eau moyenne Wmoy %			11,6		
Teneurs en eau après imbibition	Tare N°		H	2		
	Poids tare (g)		32,5	30,0		
	Poids total humide+ tare(g)		212,0	215,5		
	Poids total sèche+tare(g)		186,6	189,0		
	Poids d'eau(g)		25,4	26,5		
	Poids matériau sec(g)		154,1	159,0		
	Teneur en eau W%		16,5	16,7		
	Teneur en eau moyenne Wmoy %			16,6		
Caractéristiques pondérales	N° Moule	hauteur h	33,0	124,1		
	Poids du moule				3462,0	
	Poids matériau humide + moule				8362,0	
	Poids matériau humide				4900,0	
	volume de l'échantillon				2283,4	
	Teneur en eau moyenne W%				16,6	
	Poids volumique humide				21,5	
	Poids volumique sec γd				18,4	
Mesure de gonflement						
Date		10 coups	25 coups	55 coups		
1 ^{er} jour			0			
4 ^{ème} jour			1,8			
Gonflement absolu Δh (mm)			1,8	Gonflement (Δh/h)*100 (%)		1,45%

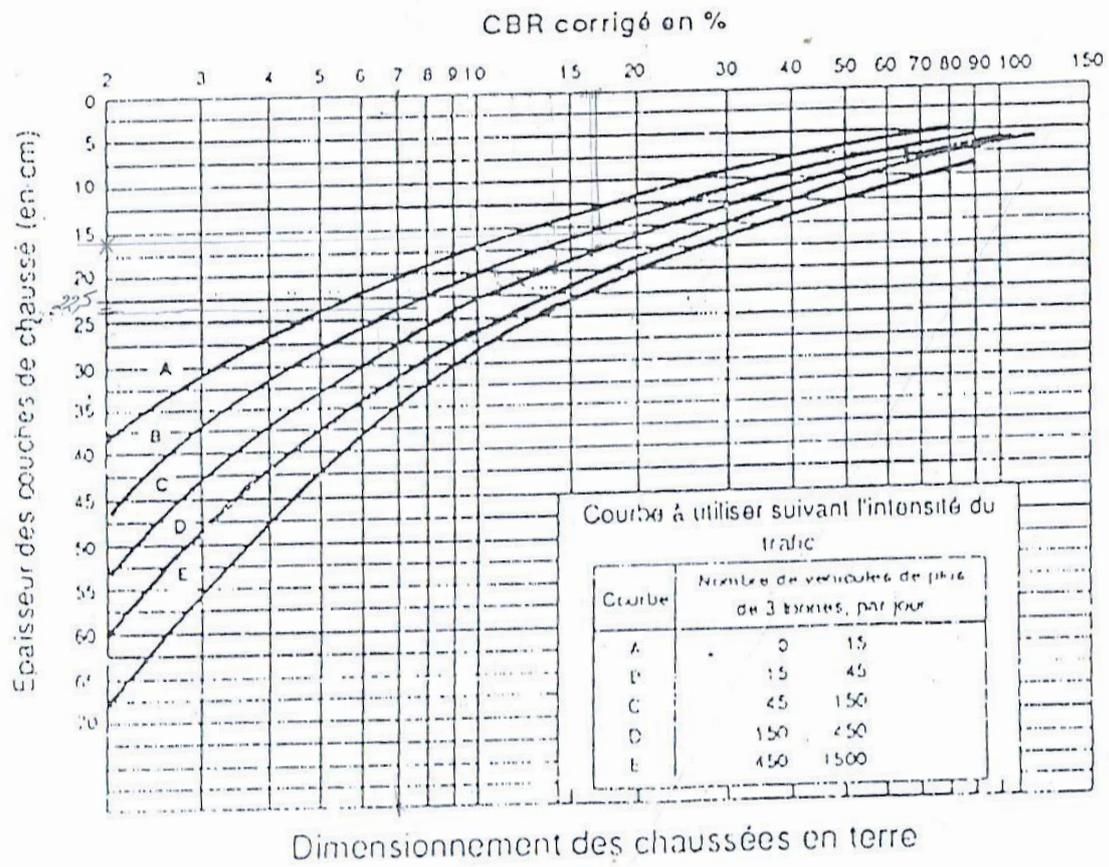
CBR Poinçonnement à 96h						
Anneau: 5KN/ 1division vaut 2Kgf			Opérateur:		Date:	
RÉSULTATS DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIE						
Enfoncements en mm	EFFORT D'ENFONCEMENT					
	10coups		25coups		55coups	
	lecture anneau	Force (Kg)	lecture anneau	Force (Kg)	lecture anneau	Force (Kg)
0,20			3,5	7		
0,40			4,0	8		
0,60			5,0	10		
0,80			6,0	12		
1,00			6,5	13		
1,25			8,0	16		
1,50			9,0	18		
2,00			11,5	23		
2,50			14,0	28		
3,00			16,5	33		
3,50			19,0	38		
4,00			22,0	44		
4,50			24,0	48		
5,00			26,0	52		
5,50			28,0	56		
6,00			30,0	60		
6,50			33,0	66		
7,00			36,0	72		
7,50			38,0	76		
CALCUL DE L'INDICE PPORTANT						
F en kilogramme	10 coups		25coups		55coups	
à 2,5mm: $\frac{F(2,5) \times 100}{1351}$			$\frac{34 \times 100}{1351} = 2,5$			
à 5mm: $\frac{F(5) \times 100}{2026,5}$			$\frac{56 \times 100}{2026,5} = 2,8$			

Indice portant Ip :

Les efforts d'enfoncements sont tracés en graphe et corrigés et on obtient les valeurs corrigées de F (2,5) et de F (5) :

- À 2,5mm :
$$Ip = \frac{F(2,5)}{13,51} \times 100$$
- À 5mm :
$$Ip = \frac{F(5)}{20,265} \times 100$$

ANNEXE N°8: ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TERRES



ANNEXE N°9 : SOUS DÉTAIL DE PRIX DU MATERIAU SELECTIONNÉ

Désignation Apport de MS
 Rendement* R= 24 m3/j
 Quantité de MS 4725 m3

Désignation	U	Quantité	Coûts directs			Dépenses directes (Ar)		Total (Ar)
			U	Quantité	PU (Ar)	Matériel	Personnel	
matériels								
Outillage	Fft	1	Fft	1	20 000,00	20 000,00		
Camion à benne	U	2	h	8	35 000,00	560 000,00		
Pelle mécanique	U	1	h	6	50 000,00	300 000,00		880 000,00
main d'œuvre								
Chef de chantier	U	1	h	2	1 250,00		2 500,00	
Chauffeur de camion	U	2	h	8	900,00		14 400,00	
Chauffeur de pelle	U	1	h	6	1 000,00		6 000,00	
Manœuvres	U	4	h	8	500,00		16 000,00	38 900,00
Total								918 900,00
							prix unitaire	38 287,50
							arrondi à	38 290,00

Le prix de matériau MS est évalué à partir du coût de son extraction.

*Le rendement s'explique par le fait que deux camions d'une capacité de 6m³ font chacun deux voyages par jours, la quantité de MS transportée par jour est donc de 6*2*2 = **24m³**, c'est le rendement journalier de l'apport de MS. le coût du matériau est calculée à partir de ce rendement.



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS -----	I
SOMMAIRE -----	II
LISTES -----	III
LISTE DES ABRÉVIATIONS : -----	III
LISTE DES SYMBOLES : -----	IV
LISTE DES FORMULES CHIMIQUES : -----	V
ÉLÉMENTS CHIMIQUES : -----	V
LISTE DES UNITÉS -----	VI
LISTE DES TABLEAUX -----	VII
LISTE DES COURBES -----	VII
LISTE DES FIGURES -----	VIII
LISTE DES PHOTOS -----	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE -----	1
Partie 1. CONTEXTE ET ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES -----	2
Chapitre 1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE -----	4
I. 1. Localisation de la Commune -----	4
I. 2. Population -----	5
I. 3. Géographie de la zone -----	6
I. 4. Économie -----	7
Chapitre 2. La route -----	8
II. 1. Définition -----	8
II. 2. Structure -----	8
II. 3. Catégories -----	10
II. 4. Différentes dégradations des routes en terres -----	12
II. 5. État de la route étudiée -----	13
Chapitre 3. La stabilisation -----	18
III. 1. Définition -----	18
III. 2. But -----	18
III. 3. Types -----	18



III. 4. Les matériaux stabilisants	19
Chapitre 4. Les sols	21
IV. 1. Définitions géotechniques des sols	21
IV. 2. Types de sols	22
IV. 3. Méthode d'identification générale des sols	23
IV. 4. Identification géotechnique ou classification des sols pour l'utilisation en couche de forme	23
Chapitre 5. La chaux	28
V. 1. Définitions	28
V. 2. Cycle d'obtention de la chaux	28
V. 3. Gisement de chaux	29
V. 4. Classification	30
V. 5. Utilisation	33
Chapitre 6. Sol - chaux	35
VI. 1. Action de la chaux sur le sol	35
VI. 2. Les critères de choix de la chaux	36
VI. 3. Aptitude d'un sol au traitement à la chaux	36
VI. 4. Mécanisme de stabilisation à la chaux	39
Conclusion partielle.....	41
Partie 2. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES	42
Chapitre 1. Prise des échantillons.....	44
I. 1. Sol	44
I. 2. Chaux	46
Chapitre 2. Identification du sol	47
II. 1. Identification chimique du sol	47
II. 2. Détermination des paramètres de nature	48
II. 3. Détermination des paramètres de comportement mécanique	57
II. 4. Détermination des paramètres d'état	57
II. 5. Autres paramètres	59
Chapitre 3. Identification de la chaux	73



III. 1.	Granulométrie par tamisage NF P 18-560	73
III. 2.	La mesure de la teneur en chaux libre	74
Chapitre 4.	Traitement À la chaux	75
IV. 1.	Objectif	75
IV. 2.	Essai Proctor modifié	75
IV. 3.	Essai CBR	77
Chapitre 5.	Résultats et interprétation des résultats	78
V. 1.	Sol	78
V. 2.	Chaux	79
V. 3.	Stabilisation	79
V. 4.	Interprétation des résultats	82
Conclusion partielle		83
Partie 3.	ÉVALUATION DU PROJET	84
Chapitre 1.	Dimensionnement de la chaussée	86
I. 1.	Trafic	86
I. 2.	Dimensionnement	88
I. 3.	Épaisseur de la chaussée selon le matériau utilisée	90
Chapitre 2.	Comparaison de la stabilisation avec du matériau sélectionné	93
II. 1.	Technique de mise en œuvre	93
II. 2.	Coût	94
Chapitre 3.	Etude d'impact environnementale	97
III. 1.	Socio-économique	97
III. 2.	Environnementale	97
Conclusion partielle		100
CONCLUSION GÉNÉRALE		101
RÉFÉRENCES		A
BIBLIOGRAPHIE		A
WEBOGRAPHIE		C
NORMES		D
LOGICIELS UTILISES		D



ANNEXES	E
Annexe N°1 : Identification chimique et perte au feu.....	F
Annexe N°2 : Exemples de calculs	I
Annexe N°3 : Classification selon la méthode HRB.....	M
Annexe N°4 : Classification selon la méthode LPC :	N
Annexe N°5: Classification selon la méthode GTR (méthode utilisée pour la norme NF P 11 300)	O
Annexe N°6 : Essai Proctor.....	Q
Annexe N°7 : Essai de portance	R
Annexe N°8: Abaques de dimensionnement des chaussées en terres	U
Annexe N°9 : Sous détail de prix du matériau sélectionné	V
TABLE DES MATIÈRES	W

Auteur : RAKOTOLAHY Fabienne Judie

Nombre de pages : 102

Nombre de tableaux : 26

Nombre de photos : 23

Nombre de figures : 8

Nombre de courbes : 7

Nombre d'annexes : 9

Titre : « Étude de stabilisation d'une chaussée en terre située à Antsakoamaro Commune Rurale d'Ambondromamy avec de la chaux de Belobaka »

RESUMÉ

La qualité d'une route en terre dépend principalement de la portance du matériau qui le constitue. Si le sol en place n'a pas les spécifications requises, une stabilisation ou un apport d'autres matériaux adéquats est nécessaire.

Le but de ce travail est d'étudier la formulation de stabilisation d'une route en terre ayant une nature argileuse avec un matériau local « la chaux ».

Les différents essais effectués ont permis de voir que le sol a une faible portance, et qu'il peut être stabilisé avec un dosage en chaux de 6%, ce dosage augmente la portance du sol jusqu'à 28 fois sa portance initiale. La réaction des particules fines du sol avec la chaux produit des floculations et modifie la propriété de l'ensemble.

Les études opérées ont aussi montré que la stabilisation à la chaux est très avantageuse par rapport à l'apport de matériau sélectionnée car elle est largement plus économique. De plus l'utilisation de la chaux favorise la protection de l'environnement car elle épargne la dégradation des zones d'emprunts.

Mots clés : Stabilisation, sol, chaux, portance, essai.

ABSTRACT

The quality of a dirt road depends mainly on the bearing capacity of the material with which it was been made. If the soil does not meet the required specifications, it is necessary to stabilize or to use other adequate materials.

This survey aims at studying the stabilization formula of a dirt road, by the use of a local material "the lime".

We carried out different tests. They have shown that this kind of soil has a weak bearing capacity and that it can be stabilized with lime dosage of 6%. This dosage has augmented the soil bearing capacity by 28 times more. The soil fin particle reaction can produce flocculation and modify the set properties.

This survey has also demonstrated that the lime is more efficient than the use of selected material because it is much more economical. Moreover the lime utilization can protect the environment more since it saves the degradation of the borrow areas.

Key words: stabilization, soil, lime, bearing, tests

Contact : +261 34 61 332 33
frakotolahy@yahoo.com

Rapporteurs: Dr RANDRIANARIVELO Frédéric
Mr RANDRIANARIVELO Lanja