



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET
METALLURGIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention de
Diplôme d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux

**« CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO - CHIMIQUES,
MINERALOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DES SOLS EN VUE DE L'AMELIORATION
DE LA DURABILITE DES ROUTES EN TERRE : CAS DE LA COMMUNE RURALE
D'AMPOHIBE - DISTRICT D'ANTALAHA – REGION SAVA**

Présenté par : DASY KELLYO, Maître géophysique - géotechnicien



PROMOTION 2011





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET
METALLURGIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention de
Diplôme d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux

**« CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO - CHIMIQUES,
MINERALOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DES SOLS EN VUE DE L'AMELIORATION DE
LA DURABILITE DES ROUTES EN TERRE : CAS DE LA COMMUNE RURALE
D'AMPOHIBE - DISTRICT D'ANTALAHA – REGION SAVA**

Soutenu par :

DASY Kellyo
Le 21 mai 2015

Membres du jury :

- Président** : - Monsieur ANDRIANARY Philippe, Professeur titulaire, Directeur de l'ESPA
- Examineurs** : - Monsieur RANDRIANARIVELO Frédéric, Maître de conférences
- Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Maître de conférences
- Monsieur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Maître de conférences
- Rapporteurs** : - Monsieur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur titulaire
- Madame RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Maître de Conférences



PROMOTION 2011



REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire et en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux et Métallurgie, je voudrais remercier tout d'abord l'Unique, Le Très-Haut, mes parents et toutes les personnes qui ont de loin ou de près m'aidé dans la réalisation de ce travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances et remerciements au :

- Professeur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider cette soutenance de mémoire.
- Professeur RANAIVONARIVO Velomanantsoa Gabriely, responsable de la formation doctorale au sein du Département de Science des Matériaux et Métallurgie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Directeur et encadreur de ce mémoire, qui n'a pas ménagé son temps et ses efforts pour m'aider à mettre à terme ce travail malgré ses diverses fonctions.
- Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Enseignante chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, co-encadreur de ce mémoire, qui m'a toujours encadré, donné des conseils et du courage.
- Monsieur Patrick POLVERELLI et Madame Marina CHALAMET, ancien et nouveau Directeur du Service Technique et Laboratoire (STL) de la Société Colas Madagascar, qui m'ont y autorisé à effectuer mon stage de recherche dans le domaine de la géotechnique et m'ont encadré professionnellement.
- Docteur RANARISON Solofo et Madame RAHANTANIRINA Françoise, ancien et nouveau Directeur du Laboratoire de l'OMNIS qui m'ont y autorisé à effectuer mon stage de recherche dans le domaine de l'analyse chimique et minéralogique.

Nous adressons aussi nos remerciements aux membres de jury :

- Monsieur RANDRIANARIVELO Frédéric, Maître de Conférences, chef de Département Science des Matériaux et Métallurgie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;
- Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Maître de Conférences à l'ESPA ;
- Monsieur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Maître de Conférences à l'ESPA ;

- Ainsi qu'à tous les enseignants et le personnel administratif et technique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, en particulier ceux de la filière Science des Matériaux ;
- Et aussi aux personnels administratifs et techniques de la Société Colas-Madagascar et du Laboratoire OMNIS ;

Mes sincères reconnaissances s'adressent également :

- A mes parents, qui m'ont soutenu moralement, matériellement et financièrement durant toutes mes études ;
- A tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce mémoire.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES CARTES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE I- ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I- GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES SOLS

CHAPITRE III. GENERALITES SUR LES TRAITEMENTS DES SOLS

PARTIE II- ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV- ETUDES PRELIMINAIRES

CHAPITRE V- METHODES DE CARACTERISATION DES SOLS

CHAPITRE VI. METHODOLOGIE DE TRAITEMENTS DU SOL

CHAPITRE VII- CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

PARTIE III- ESSAI D'AMELIORATION DES SOLS ETUDIES

CHAPITRE VIII- CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DE TRATEMENTS

CHAPITRE IX- ESSAIS SUR LE SITE 1 - ECHANTILLON ES1

CHAPITRE X- ESSAIS SUR LE SITE 2 - ECHANTILLON ES2

CHAPITRE XI - ESSAIS SUR LE SITE 3 - ECHANTILLON ES3

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
OMNIS	: Office des Mines et des Industries Stratégiques
COLAS	: Cold Asphalt
NF	: Norme Française
AFNOR	: Association Française de Normalisation
ASTM	: American Standard Test Method
MVR	: Masse Volume Réelle
ES1	: Echantillon prélevé sur le Site N°1
ES2	: Echantillon prélevé sur le Site N°2
ES3	: Echantillon prélevé sur le Site N°3
RI	: Résidu Insoluble
CR	: Commune rurale
pw	: Masse volumique de l'eau
CEC	: Capacité d'échange Cationique
Wnat (%)	: teneur en eau naturelle
WL	: limite de liquidité
WP	: Limite de plasticité
Ip	: Indice de plasticité
Ic	: Indice de consistance
ES	: Equivalent de sable
CBR_i	: Indice CBR après immersion dans l'eau
Wopm	: Teneur optimum
pd OPM	: Masse volumique sèche à l'optimum Proctor
PF	: Perte au feu
S_s	: Surface spécifique
MO	: Matière organique
VBS	: Valeur au bleu de bromothymol
Ech	: Echantillon
D_m	: Dimension maximale des grains
d/D	: Classe granulaire avec d le plus petit grain et D le plus grand grain d'un même granulat
RNS 53	: Route Nationale Secondaire numéro 53

LISTE DES CARTES

Carte 1: Localisation du site	3
Carte 2: Carte géologique de la commune rurale d'Amphibe.....	8
Carte 3: Carte pédologique de la commune rurale d'Amphibe	11
Carte 4: Localisation des points d'échantillonnages	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1: schéma représentatifs des différentes phases du sol	18
Figure 2: éléments constitutifs d'un sol	19
Figure 3: Structure générale des minéraux argileux [4].....	26
Figure 4: Abaque de plasticité de Casagrande et position des minéraux argileux les plus connus	26
Figure 5: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature [13]	33
Figure 6: Coupe de sondage des points d'échantillonnages.....	49
Figure 7: Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche	63
Figure 8: détermination de l'équivalent de sable	65
Figure 9: diagramme de compositions chimiques.....	74
Figure 10: Position des échantillons dans l'abaque de Casagrande.....	81
Figure 11: Courbe d'analyse granulométrique	83
Figure 12: Détermination de la limite de liquidité pour ES1	85
Figure 13: Détermination de la limite de liquidité pour ES2	85
Figure 14: Détermination de la limite de liquidité pour ES3	86
Figure 15: Courbe Proctor ES1	89
Figure 16: Courbe Proctor ES2	90
Figure 17: Courbe Proctor ES3	90
Figure 18 : Courbes efforts-déformations des trois échantillons non traités	92
Figure 19: Classification des sols étudiés.....	93
Figure 20: Courbe d'extinction de la chaux vive	97
Figure 21: Courbes granulométriques des matériaux pour la lithostabilisation	100
Figure 22: Courbe d'évolution de la masse volumique sèche maximale pour ES1 traité	105
Figure 23: Gonflement volumique de l'ES1 traité	105
Figure 24: Résistance à la traction indirecte - ES1 traité.....	106
Figure 25: Module d'élasticité – traitement chimique ES1	106
Figure 26: Courbe de visualisation des résultats d'amélioration du sol ES1	107
Figure 27: Evolution de la granularité de l'ES1	109
Figure 28: Courbe d'évolution de la masse volumique.....	113
Figure 29: Variation des gonflements volumiques des mélanges – ES2 traité.....	114
Figure 30: Résistance à la traction directe - traitement chimique ES2	114
Figure 31: Module d'élasticité des mélanges à 28 jours – ES2 traité.....	115
Figure 32: Courbe d'évolution des résultats d'améliorations du sol ES2 traité.....	115

Figure 33: Evolution de la granularité de l'ES2	117
Figure 34: Variation de la masse volumique des mélanges - ES3 traité	121
Figure 35: Gonflement volumique d'ES3 traité.....	122
Figure 36: Résistance à la traction indirecte - ES3 traité.....	122
Figure 37: Module d'élasticité à 28jours - ES3 traité.....	123
Figure 38: Evolution des résultats d'amélioration du sol ES3 - traitement chimique	123
Figure 39: Evolution de la granularité de l'ES3	125
Figure 40: Etat solide sans retrait	d
Figure 41: Etat solide avec retrait.....	d
Figure 42: Etat plastique	e
Figure 43: Etat liquide	e
Figure 44: États de consistance d'un sol.....	f

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Zone inondable et érosive.....	13
Photo 2: Ancienne route abandonnée vers CAP-EST	14
Photo 3: Pont détruit.....	14
Photo 4: Ancienne route vers CAP-EST (Croisement aéroport).....	15
Photo 5: Déviation vers la zone d'étude (Route actuelle vers CAP-EST).....	15
Photo 6: Situation avant période de pluie - Mahatsara	16
Photo 7: Photo après période de pluie - Mahatsara	16
Photo 8 : Tronçon près d'Ambodipont	16
Photo 9 : Dégradation du tronçon - Ambodipont	17
Photo 10 : Zoom sur la dégradation avec structure argileuse – Ambodipont actuel.....	17
Photo 11: Sites d'échantillonnages entre Mahatsara et Ambodipont	48
Photo 12: Débroussaillage	50
Photo 13 : Echantillonnage.....	50
Photo 14: Prise des coordonnées avec GPS	51
Photo 15 : Tamisage	56
Photo 16: pesage du refus	56
Photo 17: sedimentometrie	57
Photo 18: mesure de la densité	57
Photo 19: préparation de l'échantillon	58
Photo 20: Malaxage et séchage	58
Photo 21: Recherche de la limite de liquidité.....	58
Photo 22: Détermination de la limite de plasticité.....	58
Photo 23: Essai à la tâche	59
Photo 24: Auréoles.....	59
Photo 25: Pesage échantillon avec pycnomètre.....	60
Photo 26: Humidification	62
Photo 27: Malaxage et homogénéisation	62
Photo 28: Sol compacté et arasé	63
Photo 29: Détermination de ph	63
Photo 30: Immersion dans l'eau pendant 4 jours	64
Photo 31: Poinçonnement	64
Photo 32: Agitateur mécanique	65
Photo 33: Eprouvette cylindrique 5cm x 5cm	66
Photo 34: Eprouvette pour Résistance à la compression	67
Photo 35: Eprouvette pour essai au gonflement volumique	67
Photo 36: Bain thermostatique réglé à 40°C.....	67

Photo 37: Imbibition dans l'eau à 40°C pendant 7jours	67
Photo 38: Conservation de l'éprouvette dans une chambre froide à 20°C.....	68
Photo 39: Contrôle de dimension de l'éprouvette après 7jours d'imbibition	69
Photo 40: Compression diamétrale après 7jours d'imbibition dans l'eau à 40°C	70
Photo 41: Essai de traction indirect et module de l'élasticité à 28 jours à 20°C	71
Photo 42: agrégat de limonite et d'hydroxyde fer dans la fraction 2,5mm d'ES1	75
Photo 43: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,500 mm d'ES1	76
Photo 44: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,1 mm d'ES1	76
Photo 45: Les minéraux représentatifs de la fraction 2,5 mm d'ES2.....	77
Photo 46: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,1 mm d'ES2.....	78
Photo 47: Les minéraux représentatifs de la fraction 2,5 mm d'ES3.....	79
Photo 48: Fraction 0.1 mm de l'échantillon ES3.....	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des sols selon le pH [10].....	24
Tableau 2: Degré de plasticité selon Ip.....	28
Tableau 3: Caractéristiques des sols à partir de la valeur d'ES [12].....	29
Tableau 4: Classes portantes du sol [17].....	31
Tableau 5: Classe portante selon le module EV2 [11].....	31
Tableau 6: Classification GTR [11].....	32
Tableau 7: Principales caractéristiques de la chaux [16].....	37
Tableau 8: Types du ciment courant.....	40
Tableau 9: Possibilité d'emploi des ciments courants avec différent type de sol [13].....	41
Tableau 10: Critères de jugement de l'aptitude d'un sol à être traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques [14]...	44
Tableau 11: Coordonnées géographiques des points d'échantillonnages.....	46
Tableau 12: Seuils de classes mécaniques des sols traités.....	71
Tableau 13: Résultats des analyses chimiques.....	72
Tableau 14: La Capacité d'Echange Cationique et la Surface spécifique.....	72
Tableau 15: Résultat d'observation microscopique d'ES1.....	75
Tableau 16: Tableau : résultat d'observation microscopique d'ES2.....	77
Tableau 17: Résultat d'observation microscopique d'ES3.....	79
Tableau 18: Résultats des analyses granulométriques.....	82
Tableau 19: Granularités des échantillons.....	83
Tableau 20: Classification granulaire.....	84
Tableau 21: Résultats sur l'argilosité.....	86
Tableau 22: Masse volumique des particules solides.....	88
Tableau 23: équivalent de sable d'ES3.....	88
Tableau 24: Caractéristiques de compactage.....	89
Tableau 25: Portance des sols non traités.....	91
Tableau 26: Classification GTR des sols étudiés.....	93
Tableau 27: Synthèse de résultats des caractéristiques chimiques des sols étudiés.....	95
Tableau 28: Synthèse de résultats des caractéristiques minéralogiques des sols étudiés.....	95
Tableau 29: Synthèse de résultats des caractéristiques géotechniques des sols étudiés.....	96
Tableau 30: Composition chimique de la chaux éteinte.....	97
Tableau 31: Composition chimique de la chaux vive.....	97
Tableau 32: Composition chimiques du ciment.....	98
Tableau 33: caractéristiques physiques du ciment.....	98

Tableau 34: Résultats d'analyses granulométriques des matériaux pour la lithostabilisation	99
Tableau 35: Paramètres caractérisant les courbes granulométriques	100
Tableau 36 : Masse volumique et coefficient d'absorption des granulats	101
Tableau 37: Résultats d'identifications géotechnique des matériaux traités pour ES1	102
Tableau 38: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements pour ES1	103
Tableau 39: Résultats d'analyses granulométriques après lithostabilisation pour ES1	108
Tableau 40: Plasticité, Proctor, CBR après lithostabilisation pour ES1	108
Tableau 41: Résultats de caractérisations géotechniques pour ES2	111
Tableau 42: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements de l'ES2.....	111
Tableau 43: Résultats d'analyses granulométriques de lithostabilisation pour ES2	116
Tableau 44: Résultats des essais de plasticité, Proctor et CBR de la lithostabilisation pour ES2	117
Tableau 45: Résultats de caractérisations géotechniques du traitement chimique pour ES3	119
Tableau 46: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements pour ES3	119
Tableau 47: Résultats de caractérisations géotechniques de lithostabilisation pour ES3	124
Tableau 48: Résultats des essais de plasticité, Proctor et CBR de la lithostabilisation pour ES3	125
Tableau 49: Classification des minéraux phyllosilicates.....	b
Tableau 50: Caractéristiques physico-chimiques de quelques minéraux argileux.....	b
Tableau 51 : Etats de consistances du sol	e
Tableau 52: Echelle de consistance selon TERZAGHI	f
Tableau 53: Consistance des sols cohérents selon leur résistance au cisaillement non drainé.....	f

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1** : LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES MINERAUX ARGILEUX
- ANNEXE 2** : ETATS DE CONSISTANCES DES SOLS
- ANNEXE 3** : ESSAIS GEOTECHNIQUES
- ANNEXE 4** : CLASSIFICATION DES SOLS FINS

INTRODUCTION GENERALE

Les infrastructures routières constituent un des facteurs qui apportent le plus d'externalités pour une économie donnée. Elles jouent un rôle primordial dans la circulation des hommes et des marchandises, dans l'approvisionnement en intrants et dans la commercialisation des produits de la région.

La plupart des régions, district et commune de Madagascar sont enclavées par l'insuffisance et la dégradation des infrastructures routières non revêtues.

D'après le rapport publié par le ministère des travaux publics et de la météorologie en 2007, le réseau routier de Madagascar est long de 25 500km dont près de 5 500 km sont constitués de routes bitumées et 20 000 km de routes non revêtues.

Dans tout Madagascar, les trafics sur les routes en terre connaissent beaucoup de difficultés particulièrement en saison de pluie entre autres :

La route RNS 5A reliant la région DIANA à celle de SAVA est presque impraticable ; la route communale reliant Nosiarina et Amboangibe - district de sambava, une zone à forte potentialité économique n'est accessible qu'avec des motos ; les routes en terre reliant la ville d'Antalaha à Vinanivao limite Sud du District d'Antalaha est pendant toute l'année, exposée à l'érosion marine et à des inondations surtout en période cyclonique.

Ce niveau de dégradation des infrastructures routières a fortement pénalisé les activités sociales et économiques de la région SAVA.

Ce présent mémoire est une contribution à l'amélioration de la durabilité de certains tronçons de route en terre au sud de la ville d'Antalaha reliant Ambavananjia-Ambodipont. Ainsi, notre sujet s'intitule :

« Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques, minéralogiques et géotechniques des sols en vue de l'amélioration de la durabilité des routes en terre : Cas de la commune rurale d'Ampohibe - District d'Antalaha – région SAVA ».

Ce travail a pour objectif d'apporter une amélioration possible d'une route en terre en agissant sur ses propriétés.

Pour mener à terme ce mémoire, la première partie se consacre sur le contexte général de la zone d'étude dans laquelle on aborde le contexte naturel, la présentation et la situation générale de la route en terre étudiée. La deuxième partie développe la méthodologie adoptée expliquant les techniques d'acquisition des données sur terrain, les travaux en laboratoire et les théories concernant les études des propriétés chimiques, minéralogiques, géotechniques et améliorations du sol. Enfin, la troisième partie concerne surtout, les études expérimentales, les résultats obtenus sur la caractérisation et les essais d'amélioration sur les sols étudiés.

PARTIE I- ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION

Cette partie concerne les documentations et les théories fournies par la littérature technique par rapport au sujet de ce mémoire. Dans cette optique, nous développons dans le premier chapitre les généralités sur la zone d'étude (Monographie et le contexte général de la route en terre étudiée). Quant au deuxième chapitre, on traitera les généralités sur les sols. Le dernier et troisième chapitre développe les généralités sur les traitements des sols.

CHAPITRE I- GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

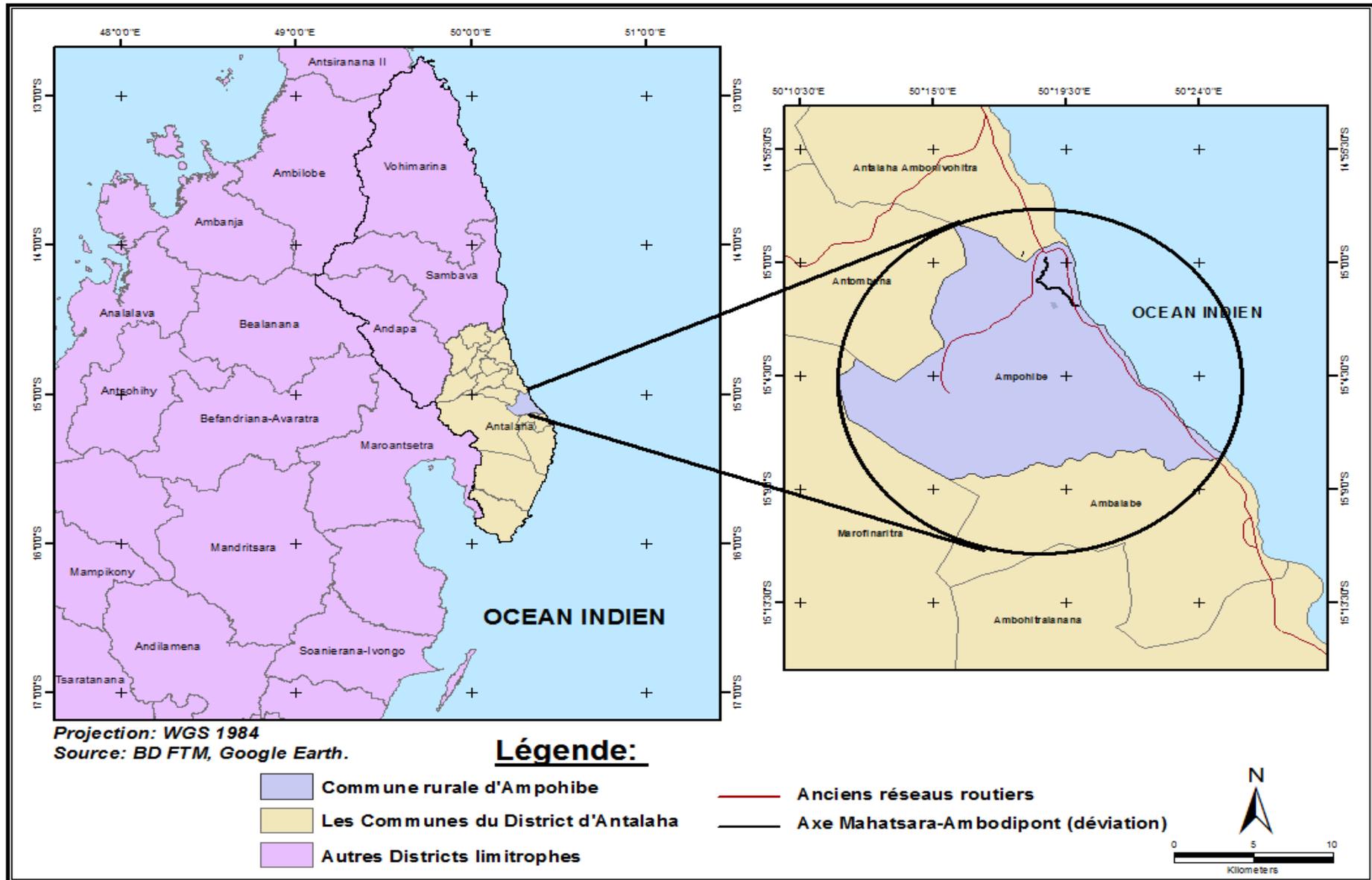
I.1 – Monographie [1] [2]

I.1.1 – Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans la commune rurale d'Amphibe à 17 km au sud de la commune urbaine d'Antalaha – région SAVA. Elle se situe plus précisément entre le Fokontany d'Ambavananjia en passant par Mahatsara jusqu'à Ambodipont.

La route en terre étudiée dans ce secteur relie les autres communes (Ambalabe, Ambohitralanana CAP-EST, Ampanavoana et plus au sud à Vinanivao) à forte potentielle touristique, forestière et produit halieutique.

LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE



Carte 1: Localisation du site

I.1.2 - Climat

En général, la région est soumise à un climat de type tropical caractérisé par une alternance d'une saison fraîche et sèche entre le mois de mai en novembre et d'une saison chaude et humide à partir de décembre.

I.1.2.1 - Température

Les variations des températures sont peu perceptibles pour l'ensemble de la région. On enregistre les plus fortes chaleurs en mois de janvier et/ou février et les mois les plus frais sont perçus en juillet et août. A Sambava, Antalaha et Vohémar, les températures varient de 18 °C à 31 °C. L'amplitude thermique est respectivement de 12,8 °C, 10,3 °C et 9,4 °C.

Andapa a une température moyenne annuelle variant de 18,3 °C à 25,2 °C. L'amplitude thermique y est plus marquée, (de 6,9 °C) à cause de son altitude relativement élevée.

I.1.2.2 - Pluviométrie

Selon la monographie, la région SAVA est caractérisée par une forte pluviométrie d'une moyenne annuelle de plus de 2 000 mm, une absence de mois véritablement sec et un faible déficit de saturation (3 à 5 mm). La zone d'Andapa se distingue par un micro climat, entre le climat de la côte Est et des Haut-Plateaux, avec toutefois une pluviométrie moyenne annuelle élevée de 1 800 mm en 130 jours. La zone Nord de la SAVA, Vohémar est caractérisée par une précipitation moyenne annuelle de 940 mm

L'abondance des précipitations annuelles et l'absence d'une véritable saison sèche constituent les principales caractéristiques de la SAVA. L'essentiel des pluies est apporté par les courants de l'Est, mais l'effet orographique y intervient aussi. La raideur des pentes, la proximité de la mer, l'orientation par rapport au flux expliquent les variations locales de la pluviométrie. Les valeurs maximales sont enregistrés là où le flux moyen frappe quasi-perpendiculairement la côte (Sambava : 2 409 mm, Antalaha 2 376 mm). Au Nord de Sambava, les totaux annuels baissent légèrement du fait de la divergence de l'Alizé (Vohémar 1 564,9 mm).

Le nombre de jour de pluies décroît du Sud vers le Nord (Antalaha 219, Sambava et Vohémar 184). La saison de pluie comporte de fortes pluies et averses brutales avec un maximum au mois de janvier. De mai en septembre prédominent de forts crachins qui pénètrent en profondeur dans les sols.

Le problème de la destruction de la couverture végétale notamment les vastes forêts a actuellement un impact sur le climat par une diminution du régime pluviométrique constatée par les habitants de la commune et une augmentation de la température.

Par la destruction de l'environnement sur l'exploitation massive et illégale des forêts, les cyclones formés dans l'Océan Indien peuvent être très dévastateurs et frappent très souvent la région SAVA et le plus touché c'est le district d'Antalaha.

I.1.3 - Végétation

La région SAVA dispose d'une importante superficie de forêt protégée (Parcs national de Masoala, parc national de Marojejy, les réserves d'Anjanaharibe sud) représentant 482 000 ha, soit 20 % de la superficie totale de la région. Les grandes parties de cette forêt se trouvent dans les districts d'Andapa et de Sambava avec respectivement 239 000 et 231 000 ha. La partie de cette étendue forestière qui est protégée représente 46 000 ha, soit 9,6 % de l'ensemble des ressources forestières. Un peu moins de 75 % de cette forêt protégée se trouve à Sambava. Toutefois, la partie de forêt détruite représente en tout 4 000 ha en une année, soit un peu plus de 1 % de l'ensemble des ressources forestières totales de la région.

La région dispose aussi des parcs marins (parc marin de Tampolo, parc marin Masoala) dans le district d'Antalaha.

I.1.4 - Population et activités économiques

La population de la Région SAVA représente dans son ensemble 5,0 % de la population de Madagascar. Le district de Sambava est le plus peuplé et représente 32,4 % de la population de la région. Les districts d'Antalaha et de Vohémar sont comparables avec respectivement 24,5 % et 25,3 % de la population. Andapa détient le plus faible nombre de population parmi les districts de la région mais c'est le district le plus petit aussi en termes de superficie. La répartition de la population entre les districts est proportionnelle à celle de la superficie des districts, sauf pour Sambava qui contient plus d'habitants. Cela traduit une densité de population assez uniforme pour la région.

La région SAVA est aussi appelé la côte de la vanille car elle produit également à elle-même seule près de 2/3 de la vanille naturelle mondiale. Cette région est également riche en produits agricole (coco, café, letchis, riz,...) et miniers (or, améthyste, quartz,...). Désormais, elle est un haut lieu de l'écotourisme avec les réserves et parcs nationaux et aussi grâce à la présence des espèces de la biodiversité.

La présence des deux aéroports de Sambava et d'Antalaha est un levier pour la relance économique du district et de la région.

A part de l'écotourisme, de l'agriculture, la partie sud d'Antalaha est aussi réputée pour son potentiel halieutique.

I.1.5- Géomorphologie

La zone Nord-Est de Madagascar constitue un ensemble massif qui est marqué par le contact rapide et brusque entre les hautes terres et la mer. Du point de vue géomorphologie, la région juxtapose des formes variées.

Les principales unités de relief sont les suivantes :

- **Les zones montagneuses** : ils sont formés par des reliefs du socle cristallin, correspondent essentiellement à des unités tectoniques spécifiques. Les mouvements tectoniques et orogéniques affectant la masse continentale, suivis par des volcanismes répétitifs de la fin du Tertiaire et du quaternaire ont mis en place des reliefs de types variés : plateau, horst, graben. Ainsi, les failles ont découpé cette région en blocs massifs vigoureusement disséqués par l'érosion. Le plateau de Makira et la presqu'île de Masoala sont des horsts encadrant le graben de la baie d'Antongil ;

- **Les bassins sédimentaires** : cette zone se caractérise par le contact socle – sédimentaire. Le volcanisme y a fait apparaître de nombreux lacs et dépressions. La cuvette d'Ankaibe s'étend largement et offre d'excellente zone de cultures de rente ;

- **La côte** : il s'agit des côtes à haute falaise marine à plus de 1 500 m d'altitude se localisant au niveau du Cap Masoala et de la baie d'Antongil. C'est là où le plateau continental prend une extension importante couvrant 2 750 km². Le Cap Masoala est entouré de nombreux îlots. La côte est parsemée de bourrelets dunaires et des végétations adaptées aux milieux côtiers tropicaux. De maigres mangroves sont localisées dans de rares endroits.

A cet effet, le relief peut être subdivisé en quatre zones : la zone littorale, la zone intermédiaire, la zone montagneuse et la cuvette intramontagnarde.

- La zone littorale composée d'une bande étroite de plaine longeant la côte d'une longueur de 270 km environ a une largeur comprise entre 8 km à 15 km. Cette plaine littorale se caractérise par la prédominance de cultures vivrières (riz et autres) de caféières et de vanilliers en périphérie ; l'altitude maximale de 60 m permet un accès moyennement aisé.

- La zone intermédiaire dont l'altitude est comprise entre 60 et 250 m se compose de nombreux périmètres irrigués avec une pratique, également, de cultures vanillière et caféière.

- La zone montagneuse avec un relief accidenté et une altitude pouvant aller jusqu'à plus de 2000 m (Marojejy) est essentiellement marquée par une déforestation croissante résultant de la pratique de cultures sur brûlis.

- La cuvette intramontagnarde de l'Ankaibe est réputée par l'existence d'excellents sols de culture. Zone d'immigration, la cuvette d'Andapa est aussi le grenier à riz du Nord-Est malgache. La culture de la vanille occupe les terres alluviales sur les vallées d'Ampanefena au Nord jusqu'au Sud d'Antalaha ;

Le passage fréquent de violents cyclones et l'abondance des pluies favorisent le phénomène érosif et changent souvent les paysages cristallins en reliefs accidentés. La zone d'étude pour ce présent mémoire se trouve sur la zone intermédiaire et littorale.

I.1.6- Hydrographie

Dans l'ensemble, la région bénéficie d'un réseau hydrographique dense. De nombreux fleuves profondément encaissés sillonnent la région du Sud-Est au Nord-Est. Trois grands ensembles de cours d'eau caractérisent le paysage hydrographique de la région. On peut citer du Nord au Sud :

- ✓ Le district de Vohémar : Manambato, Fanambana, Manambery ;
- ✓ Le district d'Andapa et de Sambava : Bemarivo, Androranga, Lokoho, Mahanara, Sambava, Ankatoka ;
- ✓ Le district d'Antalaha : Ankavanana, Ankavia, Ankaviahely, Sahafihitra et Onive.

Les ruisseaux côtiers y sont abondants, prenant source dans les collines et massifs internes. Ils donnent lieu à des bassins versants de superficie moyenne et des vallées forestières de petite étendue. Une partie de la zone d'étude se trouve au bord de la rivière d'Andrarony qui est toujours menacée par l'inondation. Les effets des crues sont amplifiés dans la zone littorale par le colmatage continu des embouchures.

I.1.7- Géologie

On distingue deux grandes catégories de terrains à savoir le terrain sédimentaire et le terrain cristallin :

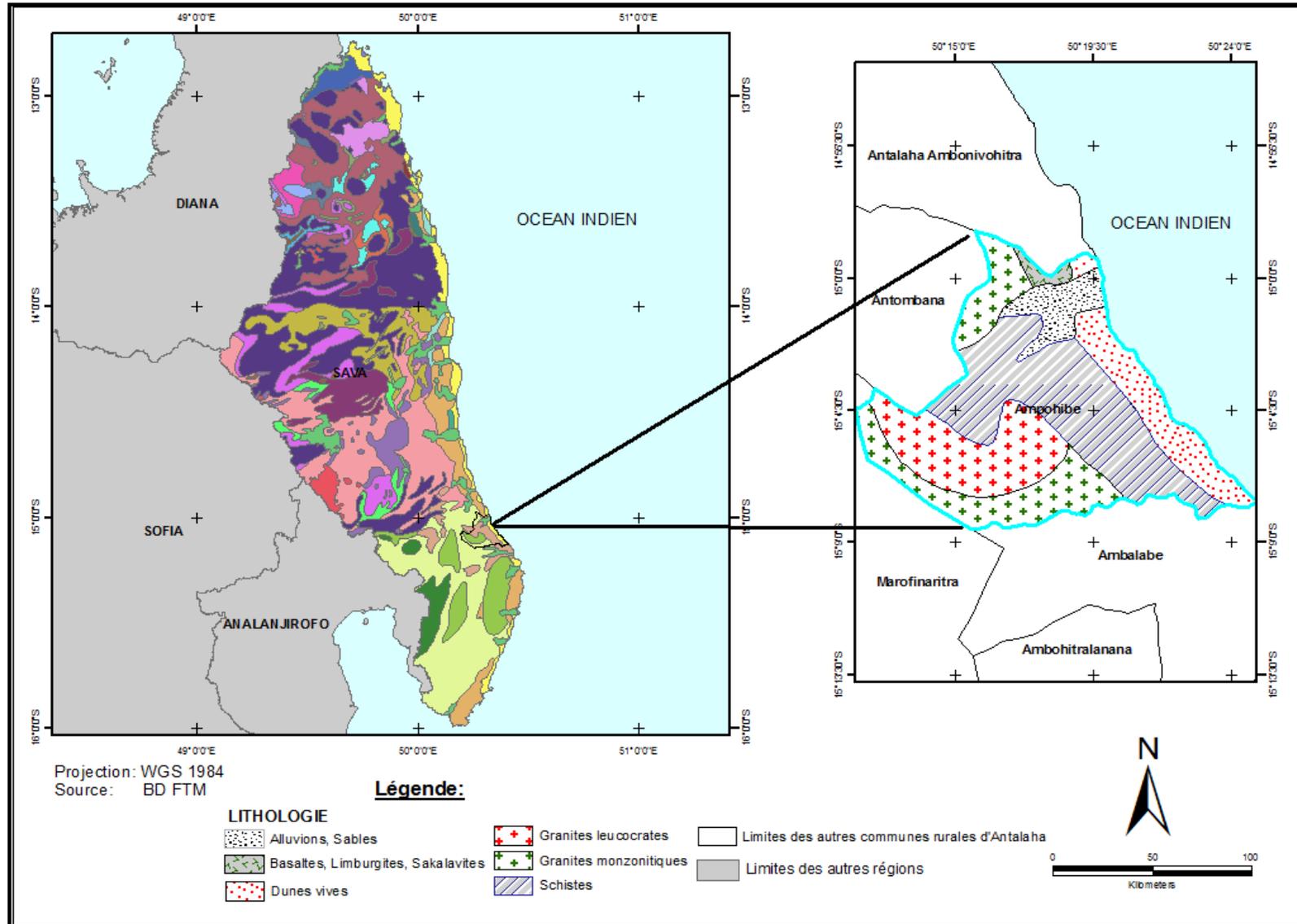
- **Les terrains sédimentaires** : formés principalement par des apports fluviaux et éoliens. Ces terrains relativement récents se sont emboîtés dans des couches plus anciennes et qui constituent la plus grande partie d'une étroite plaine côtière. Cette plaine, constituée de terrains sédimentaires repose en grande partie sur un socle précambrien.

- **Les socles cristallins** : les mouvements tectoniques et orogéniques affectant la masse continentale, suivis par des volcanismes répétitifs de la fin du Tertiaire et du quaternaire ont mis en place des formations géologique variés.

Par conséquent, ils sont formés de différents ensembles de roches (plutonismes, métamorphismes, volcanismes) appartenant dans le groupe de Daraina, le complexe granodioritique et de l'Isalo I. Quant à la zone d'étude, elle se trouve dans le groupe d'Antongil.

Les formations géologiques de la zone d'étude et une aperçue de la région SAVA sont représentées dans la carte suivante :

GEOLOGIE DE LA COMMUNE RURALE D'AMPOHIBE - DISTRICT D'ANTALAHA - REGION SAVA



Carte 3: Carte géologique de la commune rurale d'Ampohibe

I.1.8- Pédologie

Dans l'ensemble, la partie littorale de la région SAVA est dominée par des sols peu évolués alluviaux plus ou moins hydromorphes moyennement organiques et sont plus ou moins drainés au Nord et au Sud d'Ampanavoana, au Sud, se trouvent des épanchements essentiellement basaltiques (crétacé) avec des sols peu évolués.

Entre ces 2 formations se trouve une zone de sols hydromorphes (organiques et minéraux) au Sud de laquelle s'élèvent des sols ferrallitiques rouge et jaune. A l'ouest d'Antalaha et au Nord d'Ampokafo se trouve également, une zone de sols ferrallitiques jaunes/rouges.

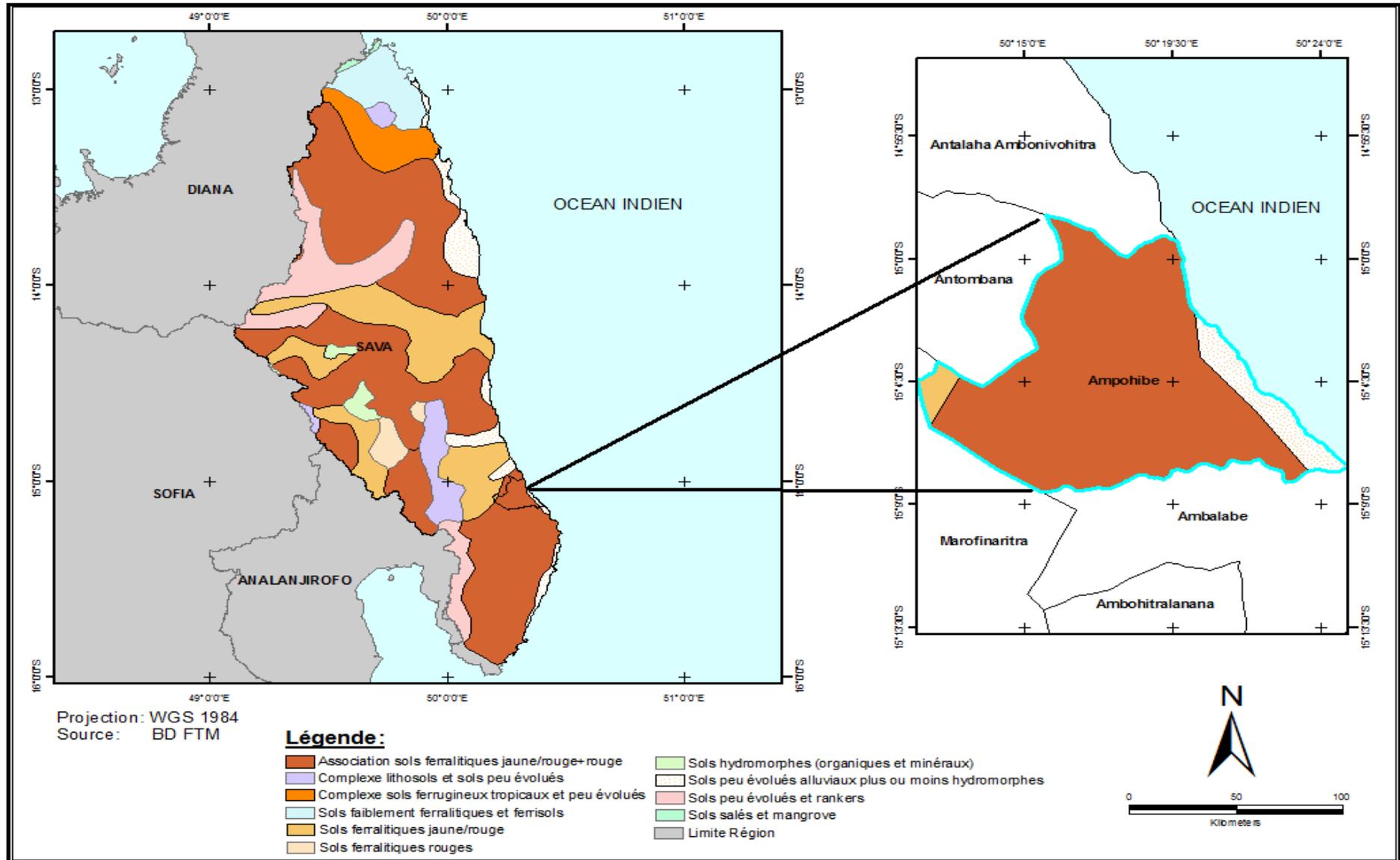
Concernant les sous-préfectures d'Antalaha et Sambava, elles ont une forte analogie du point de vue pédologie, sauf dans la péninsule Masoala, où on rencontre en plus, des massifs granitiques.

A noter que les épanchements volcaniques, les formations basaltiques, légères, perméables, riches en humus et en éléments minéraux (potasse, chaux) sont très recherchés pour la culture vanillière.

Les terres alluvionnaires silico-argileuses sont également très aptes aux cultures.

La carte suivante montre les différents types de sols rencontrés dans la région SAVA et dans la commune rurale d'Ampohibe

PÉDOLOGIE DE LA COMMUNE RURALE D'AMPOHIBE - DISTRICT D'ANTALAHA - RÉGION SAVA



Carte 4: Carte pédologique de la commune rurale d'Ampohibe

I.2 - Contexte général de la route en terre étudiée [1] [2]

I.2.1 - Les infrastructures routières de la région SAVA

La région dispose de route bitumée reliant Vohémar et Antalaha ainsi que de Sambava et Andapa. A part ces artères, les routes et les pistes sont généralement en mauvais état et restent difficilement accessibles.

Les communes de la région se situent dans la majorité à plus de 11 km des chefs-lieux de district les plus proches soit, 86,1 % des communes. Seules 13,9 % des communes se situent à moins de 10 km. Malgré cette grande distance avec les chefs-lieux de districts les plus proches, une grande partie des communes sont toutefois accessibles du fait de l'existence des routes nationales bitumées qui traversent la région. 41,8% des communes restent accessibles en voiture légère toute l'année. Une proportion de 27,9 % des communes le sont en période sèche uniquement.

Toutefois, 30,4% des communes restent inaccessibles en voiture légère et 21 % ne le sont pas même en voiture tout terrain. Les communes non accessibles en tout terrain utilisent généralement la marche ou la pirogue comme moyen de déplacement. En termes de durée, il faut en moyenne plus d'une demi-journée pour le déplacement entre ces communes inaccessibles et le chef-lieu de la région. Les communes pourvues de terminus qui facilitent d'autant plus la circulation représentent 35,4 % de l'ensemble des communes de la région. La proportion des communes desservies par une ligne régulière de transport en commun représente 51,9 % de l'ensemble des communes.

I.2.2 - Historique de la route en terre étudiée

Le tronçon de la route en terre étudiée est la déviation de la RN53 appelée actuellement «Route d'Intérêt Régionale ». Face aux changements climatiques, on constate une augmentation en nombre et en puissance des catastrophes naturelles. Dans ce cas, les cyclones tropicaux tirent presque chaque année à travers le Nord-Est de Madagascar. Depuis l'an 2000, le district d'Antalaha a été grandement ravagé par ce type de catastrophe naturelle. Les plus violents parmi ces cyclones sont : Hudah en 2000, Gafilo (2004), Indlala et Jaya en 2007.

Ainsi, ils sèment ruines et désolation sur leur passage, sans parler des pertes en vie humaines, infrastructures et les conséquences néfastes sur l'économie. Ces catastrophes pourraient donc réduire à néant les efforts de développement entrepris durant plusieurs années et contribueraient à faire des nouveaux pauvres ainsi qu'empirer la vulnérabilité de la population.

L'une des infrastructures souvent touchée par ces cyclones est cette Route d'Intérêt Régionale (destruction des ponts et du corps de remblais...) reliant l'Aéroport d'Antalaha (Antsirabato) à la commune de Vinanivao le plus au sud du District d'Antalaha. Cette route est distante de 144 km à partir de la ville d'Antalaha. Les

photos suivantes montrent la zone inondable et érosive avec ses effets sur l'infrastructure routière et autres.

ZONE INONDABLE ET EROSIVE ENTRE MAHATSARA - AMBODIPONT



Photo 1: Zone inondable et érosive



Photo 2: Ancienne route abandonnée vers CAP-EST



Photo 3: Pont détruit



Photo 4 : Ancien village d'Ambodipont abandonné

I.3. les communes concernées

Les quatre (04) communes rurales au sud de la commune urbaine d'Antalaha utilisant directement cette route sont :

- La commune rurale d'Ampohibe : composée de 19 Fokontany (Antsirabato, Mahatsara, Ambodipont, ...) avec 25549 habitants, bordant le littoral Est et le long des rivières Andrarony et Anivorano.
- La commune rurale d'Ambohitalanana : composée de 11 Fokontany dont le nombre de population atteint 11490 en 2011.
- La commune rurale d'Ampanavoana : composée de 10 Fokontany avec 12381 d'habitants.
- La commune rurale de Vinanivao : composée de 05 Fokontany dont le nombre de population atteint 11878 selon CLGRC en 2011. Il s'agit d'une commune abritant le Parc Masoala (Parc forestiers et trois aires marines protégées) qui est la plus grande des aires protégées de Madagascar.

Par le potentiel touristique, halieutique et forestier de ces communes, cette route a aussi un reflet dans les trois autres districts (Sambava, Andapa et Vohémar). Donc ses impacts au niveau régional sont incontournables.

I.4. Problématiques de la route en terre étudiées et gestion de risque et de catastrophe

Face aux destructions et réhabilitation répétitives de certains tronçons de cette route, le projet CARE International a mis en place des déviations et délocalisé certains villages. Ces déviations servent au ravitaillement de la population et gèrent les éventuels risques et accidents.



Photo 4: Ancienne route vers CAP-EST
(Croisement aéroport)

La route en terre étudiée dans ce présent mémoire est la première déviation au sud de l'Aéroport d'Antalaha, plus précisément de Mahatsara à Ambodipont.



Photo 5: Déviation vers la zone d'étude
(Route actuelle vers CAP-EST)

Cette route présente 03 points particuliers : une zone basse à sable fin qui est sensible à l'inondation près du pont Mahatsara à côté de la rivière Andrarony ; une zone rocailleuse et latéritique en altitude et une autre partie basse argileuse.

Pour cela, à chaque forte pluie et en saison cyclonique, un tronçon d'environ 400m est toujours inondé et nécessitera une amélioration à cause de l'instabilité des matériaux sur place.



Photo 6: Situation avant période de pluie - Mahatsara

Photo 7: Photo après période de pluie - Mahatsara

Un autre tronçon de route près d'Ambodipont est très glissant et boueuse. Cette partie pourrait provoquer un risque et catastrophe en cas de non amélioration et entretien, elle s'étale sur une longueur environ 1.5km.



Photo 8 : Tronçon près d'Ambodipont

Un tronçon sur une longueur environ 1.2km, en cas de pluie, les automobiles trouvent des difficultés pour accéder à cause de l'embourbement. Il s'agit d'un terrain argileux. Ce problème est très significatif au niveau du village d'Ambodipont.



Photo 9 : Dégradation du tronçon - Ambodipont



Photo 10 : Zoom sur la dégradation avec structure argileuse –
Ambodipont actuel

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES SOLS

II.1 - Définition et formation des sols

Il existe plusieurs définitions du sol suivant que l'on s'intéresse à un problème de géologie, de pédologie, ou de géotechnique.

Du point de vu géotechnique, on peut définir un sol comme faisant partie des roches meubles ou plastiques, ou encore comme étant une formation géologique superficielle résultant de l'altération chimique (oxydation, hydratation ...), physique (variation de température, gel, ...) ou mécanique (érosion, vagues, ...) des roches mères de l'écorce terrestre. Pour éliminer les imprécisions de langage au niveau de sa désignation, une étude des caractéristiques physiques est nécessaire de manière à aboutir à une classification géotechnique rationnelle. [3] [4]

II. 2 - Les éléments constitutifs [3] [4]

II.2.1- Modèles élémentaires d'un sol

Les phases constitutives d'un sol peuvent être rassemblées dans les modèles suivants :

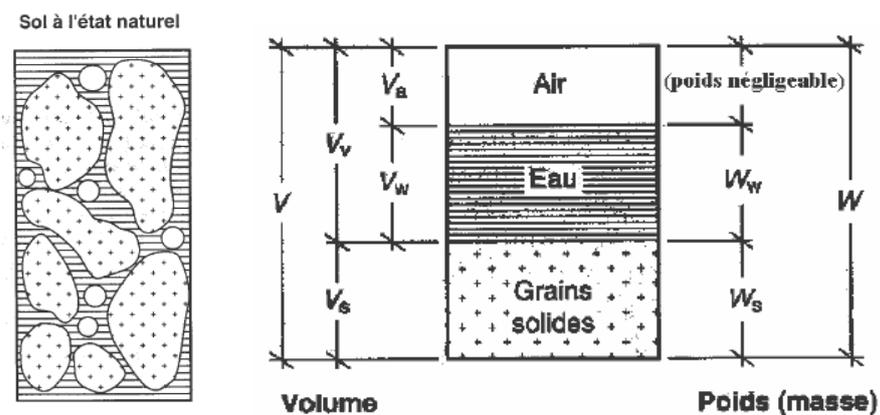


Figure 1: schéma représentatifs des différentes phases du sol

V : Volume total de l'échantillon de sol

V_a : volume d'air contenu dans l'échantillon de sol

V_w : volume d'eau contenu dans l'échantillon de sol

V_s : Volume des grains solides contenus dans l'échantillon de sol

W_a : Poids de l'air contenu dans l'échantillon de sol ; il est en général négligeable

II. 2.2 - Les éléments constitutifs

Un sol est donc constitué d'un mélange de trois phases :

- **Une phase solide** : Cette phase comporte les grains de petite à grande dimension et les substances organiques inertes, mais aussi les êtres vivants. Elle constitue le squelette du sol.
- **Une phase liquide** : Elle est représentée par l'eau remplissant partiellement les vides existants entre les particules.
- **Une phase gazeuse** : Cette phase est constituée par un mélange d'air et de vapeur d'eau qui occupe les vides restant de la phase solide.

Lorsque tous ces vides sont remplis d'eau, la phase gazeuse est inexistante et le sol est dite saturé. L'élément gazeux joue un rôle important en pratique, en particulier dans le compactage des sols.

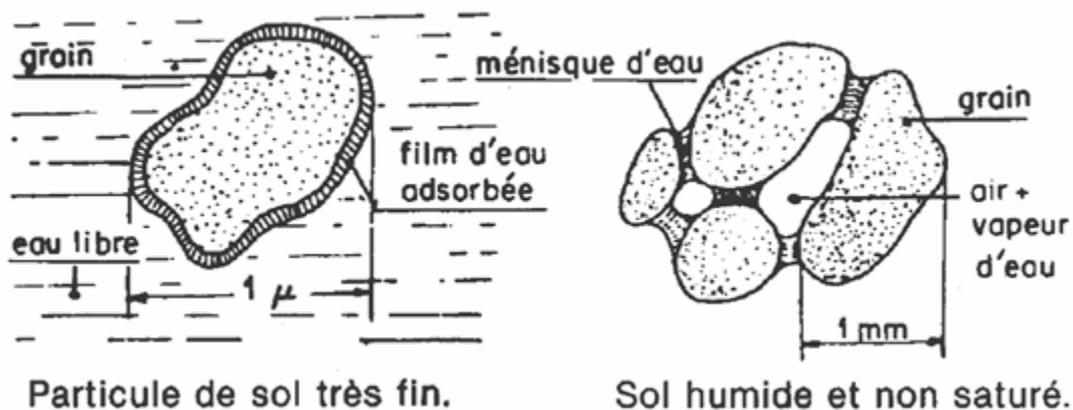


Figure 2: éléments constitutifs d'un sol

II. 2.3 - Les grandes familles de sol [3] [5] [6]

Le géotechnicien définit deux grandes familles de sol :

- les sols grenus qui sont de dimension supérieure à 20 μm (0,02 mm) : sables et graviers
- et les sols fins de dimensions inférieures à 20 μm : limons et les argiles.

Les sols grenus sont ceux pour lesquels les caractéristiques géotechniques sont déterminées par des forces de volume ou de pesanteur. Ils sont en général pulvérulents. Ils sont surtout définis granulométriquement par des :

- Sables 50% des grains au moins sont compris entre 0,02 et 2 mm
- Graviers 50% des grains au moins sont compris entre 2 et 20 mm

Les limons (ou Silts)

La définition la plus admise est celle d'un sol dont la majeure partie des grains est comprise entre 2 et 20 μm (définition purement descriptive). Ils sont en grande partie formés de quartz.

On distingue suivant leurs origines :

- Les limons éluviaux formés par altération sur place d'un substratum favorables (à l'altération),
- Les limons de ruissellement et d'inondation qui se présentent en strates.

Les argiles

On peut les définir granulométriquement comme une roche dont les grains sont compris entre 2 et 0,2 μ . C'est une roche sédimentaire terreuse faisant pâte avec l'eau. On le dit plastique. La plasticité d'un matériau est caractérisée par le fait qu'il peut être déformé d'une façon permanente, à volume constant, sans perdre sa cohésion interne.

On distingue suivant leur origine :

- Les argiles d'altération : formées principalement par l'altération des calcaires en climat tempérés ou l'altération des latérites en climat chaud et humide.
- Les argiles fluviatiles : Elles se déposent surtout dans le lit majeur des fleuves, lors des décrues.
- Les argiles lacustres : déposées dans les lacs et étangs.
- Les argiles marines : Ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par la diagénèse.

Remarque :

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physicochimiques, etc...

Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

II. 3 - Propriétés des sols

Dans le cas de traitement du sol, d'autres paramètres à ne pas négliger sont les paramètres chimiques (les oxydes et hydroxydes, phosphates, sulfates, sulfures, nitrates, chlorures, etc) et minéralogiques (les minéraux argileux) d'un matériau.

II.3.1 – Caractéristiques chimiques des sols

II.3.1.1 - Les oxydes et les oxy-hydroxydes

Vis-à-vis d'un éventuel traitement au sol, les teneurs en élément chimique comme les oxydes et hydroxydes sont significatives. Ils sont à l'état cristallisés ou amorphes, ce sont surtout :

- La Silice (SiO_2) ;
- Les Oxydes d'Aluminium (Al_2O_3) ;

- Les Oxydes de Fer (Fe_2O_3) ;
- Les Oxydes de Titane (TiO_2) ;
- Les Oxyde de Calcium ou chaux libre (CaO) ;
- L'Oxyde de Magnésium (MgO)

Ils ont la propriété de fixer des ions, comme les argiles, ils sont globalement électro positifs et adsorbent les ions négatifs (Phosphates PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , sulfates SO_4^{2-} , nitrates NO_3^- ...), ils participent à la capacité d'échange anionique (CEA) du sol, mesurée en meq/100g.

L'augmentation de leur densité contribue au renforcement des propriétés mécaniques des argiles et des sols argileux.

Ils peuvent être à l'origine de liens entre limons fins et matière organique, Ils ont la propriété de donner une couleur au sol (vives, rouges ou jaunes) : La couleur rouge est provoquée par la présence d'hématite et la couleur jaune par la goethite. La teneur en MgO a une incidence sur le calcul des teneurs en dolomite, montmorillonite, chlorite et des argiles fibreuses. [4] [7] [8] [9] [19]

II.3.1.2 -Les nitrates

La fixation de l'azote atmosphérique et la minéralisation de la matière organique mènent, par une succession de réactions biochimiques, à la production d'ions ammonium, nitrite et nitrate, formes principales de l'azote dans les sols. Les sources de nitrates sont naturellement présentes en faible quantité, de l'ordre de 10mg.kg^{-1} jusqu'à 200mg.kg^{-1} dans un limon sableux. Les ions nitrate sont très facilement lessivables. Leur rétention physico-chimique est faible voire nulle. Les quantités solubilisées dépendent alors de nombreux facteurs tels que les précipitations, la nature du sol, du couvert végétal, le mode d'utilisation des terrains, etc.

Dans le cadre du traitement des sols, les composés azotés sont signalés par le GTS comme retardateurs voire inhibiteurs de la prise des liants.

- La réaction entre l'ion ammonium et la chaux entraîne des retards de prise. Elle provoque le dégagement d'ammoniac et probablement une baisse de pH du milieu jusqu'à la disparition des ions ammonium. La prise du ciment peut ensuite s'effectuer ;
- L'ion nitrate favorise la stabilité en solution de l'ion calcium si les conditions de pH 12,4 et de saturation du milieu le permettent. Il en résulte la formation de minéraux expansifs de nitroaluminate de calcium et une fissuration du matériau traité à terme. [4] [7] [8]

II.3.1.3 - Les phosphates

Le GTS signale les phosphates comme retardateurs voire inhibiteurs de prise : les ions phosphate, à un pH de 12,4, se trouvent sous la forme PO_4^{3-} et réagissent avec les ions calcium pour former des phosphates de calcium (hydroxyapatite) insolubles retardant la prise. Cette formation pénalise la résistance mécanique du sol traité.

En l'absence de liant hydraulique, l'acide phosphorique H_3PO_4 (2 à 3% par rapport à la masse sèche de sol) est utilisé comme agent chimique stabilisateur des sols. [4] [7] [8]

II.3.1.4 - Les chlorures

Les chlorures sont largement répandus dans la lithosphère. Leur concentration totale dans l'écorce terrestre est estimée à 1900ppm tandis qu'elle serait de 0,07 à 70ppm dans les eaux douces naturelles et de l'ordre de 17500ppm dans l'eau de mer. Ainsi, la présence naturelle de chlorures dans les sols est attribuée généralement aux embruns marins et aux intrusions d'eau de mer dans les zones côtières et plus rarement aux émanations volcaniques. Ils sont généralement présents sous forme de sels solubles NaCl et KCl (solubilités dans l'eau respectives de 360 et 350g.L⁻¹ à 20°C). La solution du sol peut contenir jusqu'à 10ppm d'ions chlorure dans un sol acide et jusqu'à 1000ppm dans un limon sableux, soit environ 1,5 à 150mg.kg⁻¹ de sol sec.

Les sols argilo-limoneux peuvent voir leur concentration en chlorure doubler voire décupler

A 20°C et à faible concentration (0,2%), les chlorures sont accélérateurs de prise. A fortes concentrations (0,9%), ils sont retardateurs. A 28°C, les chlorures sont retardateurs quelle que soit leur concentration.

La capacité de rétention des ions chlorure est contrôlée par les rapports CaO/Al₂O₃, un rapport élevé favorisant la formation du sel de Friedel et cela même pour de faibles concentrations en chlorure (< 0,1%).

Les ions Cl⁻ réagissent avec les ions Ca²⁺ et Al³⁺ pour former Ca₂.Al(OH)₆.Cl.(H₂O)₂, minéral qui se dépose à la surface des argiles, sans en améliorer la cohésion. En générale, l'anion retarde le développement des composés calciques, CAH et CSH.

Donc, les chlorures accélèrent ou retardent la prise et provoquent un risque de gonflement. [4] [7] [8] [9]

II.3.1.5 - Les sulfates et les sulfures

Les deux sources naturelles les plus communes des sulfates sont :

- la pyrite, FeS₂ : présente en particulier dans les marnes, elle s'altère rapidement dans les conditions de surface (en milieu oxydant) et forme des oxydes et hydroxydes métalliques (oxyde de fer Fe₂O₃, hydroxyde de fer Fe(OH)₃, jarosite HFe₃(SO₄)₂(OH)₂...) et des sulfates (acide sulfurique H₂SO₄, sulfate ferreux FeSO₄, gypse Ca₂SO₄.2H₂O...);

- Le gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: il peut être présent initialement ou provenir de l'altération de la pyrite. En milieu aqueux, le gypse est soluble à la concentration de $2,4\text{g.L}^{-1}$ à 20°C , ce qui en fait le moins soluble des sulfates présents dans le sol. En comparaison, les sels solubles K_2SO_4 et Na_2SO_4 , fréquemment présents dans les milieux sédimentaires, ont des solubilités de 109 et 209g.L^{-1} à 20°C .

L'autre source naturelle identifiée est le milieu marin : les embruns sont une source de sulfates.

Hormis quelques sols particuliers, les teneurs en composés soufrés, sulfurés ou sulfatés décelées dans la plupart des sols sont généralement faibles, de l'ordre de 15 à 30mg.kg^{-1} de sol sec. Elles peuvent atteindre 150mg.kg^{-1} dans un limon sableux. L'existence et la stabilité des différents dérivés du soufre (pyrite FeS_2 , sphalérite ou blende ZnS , galène PbS , gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$...) dépendent des conditions physico-chimiques du milieu, en particulier de l'état d'oxydoréduction et du pH des sols.

Ces éléments sont les responsables de la formation d'étringite avec risque fort de gonflement pouvant conduire à la destruction de la prise et diminue la résistance mécanique. A $0,50\%$ par rapport à la masse du ciment CEM I 32,5 les ions sulfates retarde la prise hydraulique. [4] [7] [8] [9]

II.3.1.6 -La matière organique

Il est nécessaire de connaître la teneur en matières organiques lorsque l'on veut stabiliser un sol avec un liant. Elles empêchent le développement de fortes résistances et entraînent une augmentation de la plasticité. Elle influence donc la dispersion des argiles. Sa présence retarde les réactions pouzzolaniques car elle enveloppe la surface de l'argile et gêne ainsi la réaction chaux/argile ou ciment/argile par la diminution du pH. Ces réactions ne se déclenchent qu'à $12,4$ de pH ; ils peuvent ne pas avoir lieu à cause du trop faible pH même après hydratation du sol. Certes, la présence de la matière organique augmente la consommation au produit de traitement. C'est pour ces risques que l'on s'intéresse à la détermination de cette valeur. [18]

Selon sa teneur en matière organique, un sol peut être classifié comme [24] :

- Sol inorganique : $\text{MO} < 3\%$
- Sol faiblement organique : $3 < \text{MO} < 10\%$
- Sol moyennement organique : $10 < \text{MO} < 30$

II.3.1.7 -Le pH

Le pH du sol est aussi une propriété importante à prendre en compte : non seulement un pH faible peut sous-entendre la présence de matière organique, mais en plus, les réactions pouzzolaniques, qui ne se

déclenchent qu'à 12,4 de pH, peuvent ne pas avoir lieu à cause du trop faible pH, même après hydratation du sol. [4]

Le tableau suivant montre les classes de réaction du sol en fonction du pH.

Tableau 1 : Classification des sols selon le pH [10]

Classe de réaction du sol	pH eau
Extrêmement acide	< 4,5
Très fortement acide	4,5 – 5,0
Fortement acide	5,1 – 5,5
Moyennement acide	5,6 – 6,0
Faiblement acide	6,1 – 6,5
Neutre	6,6 – 7,3
Faiblement alcalin	7,4 – 7,8
Moyennement alcalin	7,9 – 8,4
Fortement alcalin	8,5 – 9,0
Très fortement alcalin	> 9,0

II.3.2–Propriétés minéralogiques des sols [3] [4] [5] [8] [9]

Les minéraux constituant les sols sont principalement des silicates (les tectosilicates, la famille des phyllosilicates), des oxydes et des hydroxydes métalliques, des carbonates. En génie civil, l'instabilité d'un sol se réfère toujours avec certains minéraux argileux instables (montmorillonite, illites, smectite, micas...) ils sont parmi les ennemis de la durabilité à part l'eau.

La minéralogie d'un sol peut être un atout pour sa stabilisation. Les minéraux siliceux et alumineux présents dans un sol peuvent, à un pH supérieur à 12,4 et une température adéquate, réagir avec la chaux grasse libérée lors de l'hydratation du ciment : cela entraîne une réaction pouzzolanique qui va permettre un gain de résistance à long terme. De même, (Modmoltin et Voottipruex 2008) ont montré qu'une bentonite traitée au ciment est plus résistante qu'une kaolinite traitée pareillement et (Thompson 1966) a montré qu'une kaolinite ou une montmorillonite étaient plus réactives à la chaux qu'une illite ou un chlorite. (Croft 1967 ; Stavridakis 2005) montrent qu'au contraire, pour un traitement au ciment, la montmorillonite ne développe qu'une faible résistance, tandis que la kaolinite et l'illite présentent de meilleurs résultats. (Le Roux et Rivière 1969) montrent quant à eux que la pyrite, même en petite quantité (teneur inférieure à 3%) annihile les effets bénéfiques du traitement à la chaux.

II.3.2.1– Les tectosilicates

➤ **Le quartz** : Il est une forme cristalline très commune de la silice (SiO_2), appartient à la famille des tectosilicates. Sa dureté et sa très faible solubilité en font un élément résistant à l'altération, il est donc très présent dans les sols.

La silice modifie la rhéologie des pâtes plastiques faites à base d'argiles. A l'état très fin, elle réagit avec la chaux en milieu très basique pour donner les silicates de calcium hydratés (CSH) servant de ponts pour les particules isolées d'une argile ou d'une latérite

➤ **Les feldspaths** : Ce sont aussi des tectosilicates avec remplacement partiel des ions Si^{4+} par Al^{3+} dans les tétraèdres. Ceci entraîne un déficit de charge qui est compensé par l'insertion dans leur structure des ions K^+ , Na^+ et Ca^{2+} . On assiste donc à la formation des feldspaths de type potassique ($(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{K}$, exemples : orthose, microcline et sanidine), sodique ($(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{Na}$, exemple : albite) et calcique ($(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8)\text{Ca}$, exemple : l'anorthite).

Les feldspaths comme la silice réagissent aussi avec la chaux en milieu très alcalin. Le développement du CSH à partir de la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux semble être insignifiant. La présence du CSH ou le minéral tobermorite améliore donc généralement les propriétés géotechniques et mécaniques des mélanges.

II.3.2.2– Les minéraux argileux : les phyllosilicates [4] [19]

Les sols de dimension inférieurs à $2\mu\text{m}$ résultent d'attaques chimiques qui se sont superposées à l'altération physique ou mécanique. Ces processus chimiques sont la dissolution sous l'action de l'eau, la combinaison et la recristallisation. Il en résulte que les particules d'un sol très fin n'ont plus la même structure cristalline que la roche mère. Ces plus petites particules ainsi formées constituent ce que l'on appellera désormais les argiles. Ces derniers matériaux ont un comportement complexe et devraient mettre en évidence pour toutes constructions génie civil.

Les argiles sont composées d'aluminosilicates hydratés. Les pluparts des grains solides qui les constituent ont une forme de plaquette. Ils sont formés par un empilement de feuillets (composés d'une superposition de couches octaédriques et tétraédriques constituées par un maillage d'ions Si, O, OH, Al et Mg) :

- Les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (kaolinite),
- Les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (illite, smectite).

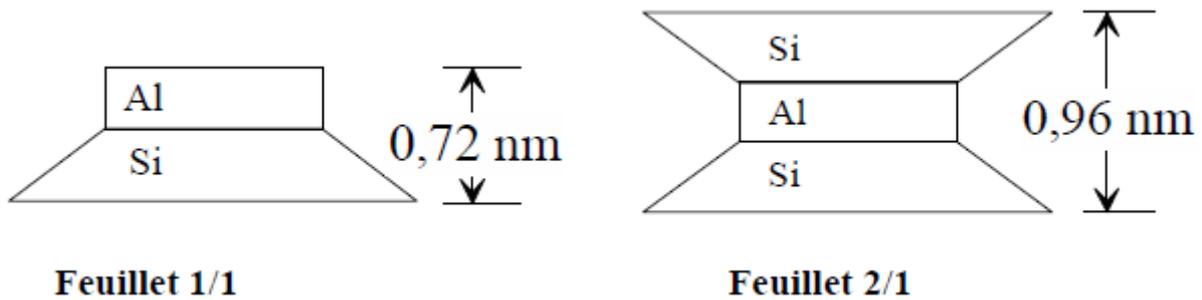


Figure 3: Structure générale des minéraux argileux [4]

a. Caractéristique chimique des minéraux argileux

Les principales caractéristiques chimiques des minéraux argileux (Annexe 1, tableau 50) qui influencent le gonflement, la plasticité, la thixotropie sont les suivantes : la densité de charge spécifique, la capacité d'échange cationique CEC et les ions échangeables.

b. Détermination des minéraux argileux par la méthode de Casagrande

C'est une démarche simplifiée basée sur les limites d'Atterberg. Il s'agit de placer sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Fig.4) les points correspondant à l'échantillon et de comparer sa position avec celle des minéraux connus. Cette méthode peut donner autant de renseignements pertinents que n'importe quelle analyse de haute précision. [8]

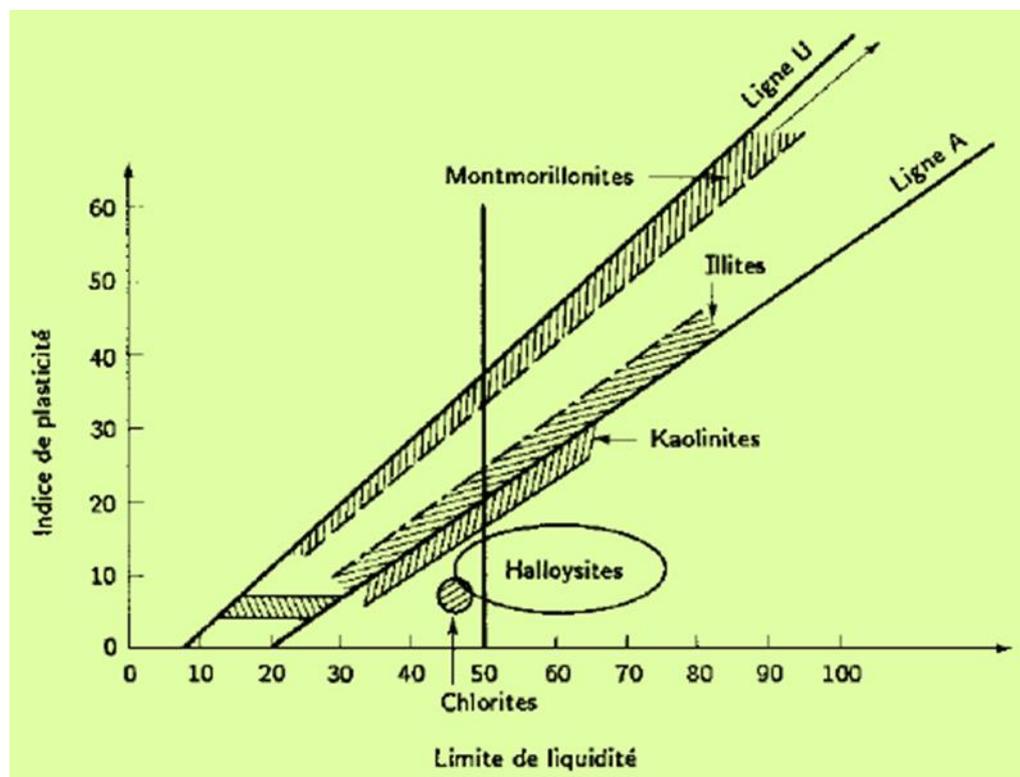


Figure 4: Abaque de plasticité de Casagrande et position des minéraux argileux les plus connus

II.3.3 – Les propriétés géotechniques des sols

Les critères de caractérisation des sols en géotechnique routière sont les paramètres de nature définissant les propriétés intrinsèques du sol (la granulométrie, l'argilosité, la teneur en matière organique, la densité sèche maximale) et les paramètres d'état liés surtout à l'environnement (la teneur en eau, l'indice de vide, la porosité,...). Il faut compléter ces deux familles de paramètres physiques par des paramètres mécaniques (la portance, les résistances à la compression et à la traction, la compressibilité, la résistance au cisaillement, le coefficient de frottement interne).

II.3.3.1 - La granularité

La granularité est l'étendue de la granulométrie, elle permet de déterminer la distribution des tailles de particules et de définir la plage de dimension minimale d à la dimension maximale D de ces particules du sol. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique selon les normes de référence (exemple pour la norme française NF P 94-056 et NF P 94-057). [6] [11]

La granulométrie permet alors d'établir une classification géométrique des sols d'ordre décroissante.

Les blocs rocheux	$D > 200\text{mm}$
Les cailloux	$20\text{mm} < D < 200\text{mm}$
Les graviers	$2\text{mm} < D < 20\text{mm}$
Les sables grossiers	$0,2\text{mm} < D < 2\text{mm}$
Les sables fins	$0,02\text{ mm} < D < 0,2\text{mm}$
Les silts ou limons	$0,002\text{mm} < D < 0,02\text{mm}$
Les argiles ou les colloïdes	$D < 0,002\text{ mm}$

Les différents seuils de la granularité sont :

- **La valeur du D_{\max}** (dimension des plus gros éléments présents dans le sol) : le seuil de 50mm sépare les sols fins, sableux et graveleux des sols grossiers. Cette caractéristique régit, en particulier, les possibilités pratiques de réaliser le mélange du sol avec le produit de traitement ;

- **Le tamisât à 0,08 mm** (ou teneur en fines) : il permet de distinguer les sols riches en éléments fins (souvent argileux) des sols sableux ou graveleux. Il permet aussi dans une large mesure, évaluer le degré de sensibilité à l'eau ce qui oriente en grande partie le choix du produit de traitement. Le pourcentage du passant à 80 μm de 35% représente le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine ($\leq 80\ \mu\text{m}$) et ce de 12% représente un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

- **Le tamisât à 2 mm** : ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse. Au-delà de 70 % on définit les sols à tendance sableuse et en-deçà les sols à tendance graveleuse.

II.3.3.2 - L'argilosité

La présence d'argile dans les sols les rend sensibles à l'eau. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau ce qui entraîne les phénomènes de gonflement, de plasticité et de cohésion. La présence d'argile augmente la plasticité d'un sol.

Cette caractéristique intervient, en premier lieu, dans le type d'application pouvant être envisagée pour le remblai ou couche de forme et dans le choix du produit de traitement. Dans une moindre mesure, les conditions de réalisation du mélange dépendent également de ce paramètre. En première approche, on peut considérer que plus l'argilosité est élevée, plus la chaux s'impose de préférence aux liants hydrauliques.

L'argilosité s'exprime par l'une ou l'autre des deux grandeurs suivantes :

- **L'indice de plasticité (I_p)**, mesuré suivant la norme NFP 94-051. Pour être correctement interprété, cet indice doit, de plus, être précisé par la valeur du tamisât à 0,40 mm du sol ;
- **La valeur au bleu de méthylène du sol (V_{bs})**. Mesurée suivant la norme NF P 94-068.

Le tableau suivant montre le classement du sol par la valeur de leur indice de plasticité.

Tableau 2: Degré de plasticité selon I_p

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Les Seuils de l' I_p retenus pour déterminer l'argilosité d'un sol sont [11] :

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

Un sol, dont l' I_p est grand est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus I_p est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. L' I_p indique aussi les risques de déformation des matériaux.

La valeur au bleu de méthylène exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol et on distingue les valeurs suivantes [11] :

VBS < 0,2 : sols sableux (sol insensible à l'eau)

0,2 < VBS < 2,5 : sols limoneux

2,5 < VBS < 6 : sols limono-argileux

6 < VBS < 8 : sols argileux

VBS > 8 : sols très argileux

II.3.3.3 - Caractéristiques des sols à partir de l'équivalent de sable

La valeur d'ES donne une indication sur la propreté des matériaux sableux contenant des particules argileuses. Le tableau suivant représente le type de sol selon cette valeur.

Tableau 3: Caractéristiques des sols à partir de la valeur d'ES [12]

ES	Type de sol
0	Argile pure
20	Sol plastique
40	Sol non plastique
100	Sable pur et propre

II.3.3.4 - La teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol avant travaux W_{nat} joue un rôle important : c'est elle (ainsi que la limite de liquidité) qui conditionne la quantité minimale d'eau à ajouter dans le mélange pour pouvoir travailler.

Il s'agit d'un paramètre d'état déterminant l'état hydrique d'un matériau et la consistance d'un sol fin exprimé en pourcentage. Elle est variable dans le temps et dépend de nombreux facteurs.

II.3.3.5 - Caractéristique au compactage [6] [15]

La déformabilité et la résistance d'un sol au cisaillement dépendent dans une large mesure de son état, c'est-à-dire :

- de sa compacité (quantité de particules), liée à la granulométrie ;
- de son humidité : paramètre fondamental de son comportement.

La portance d'un sol augmente par augmentation du frottement interne et de la cohésion, compacité.

L'augmentation de ce dernier par compactage implique :

- La réduction du volume des vides et diminution de la perméabilité ;
- La diminution de la déformabilité ;
- L'amélioration la résistance du sol.

La compacité qu'atteindra un sol compacté dépend de sa teneur en eau au moment de la mise en œuvre et de l'énergie de compactage ainsi que du mode de sollicitation (compression statique, pétrissage, vibrations, chocs...). Un essai de compactage en laboratoire pour améliorer ces comportements physico-mécaniques est « l'essai Proctor ».

La masse volumique sèche obtenue permet de calculer la densité sèche γ_d . Cette densité pourrait être interprétée comme suit :

- $\gamma_d < 1.6$: lâche
- γ_d entre 1.6 et 1.8 : dense
- $\gamma_d > 1.8$: très dense

La masse volumique sèche du sol ρ_d est un paramètre qu'il est nécessaire de connaître afin de déterminer le dosage en liant utilisé. Ce dosage en liant dépend de la masse de sol en place. De plus, une faible densité sèche implique le plus souvent une forte teneur en eau : cela doit être pris en compte pour le dosage en liant, afin d'obtenir un mélange convenable.

II.3.3.6 - La portance du sol

La capacité d'une route à subir l'effet du passage des véhicules est donné par sa portance. La portance, ou force portante d'un sol en technique routière, peut être définie comme l'aptitude de ce sol à supporter des charges répétées sans subir des déformations conduisant à sa rupture. Il s'agit d'une valeur essentielle à déterminer pour la caractérisation d'un sol destiné à une utilisation routière. Elle est déterminée par l'essai CBR (California Bearing Ratio).

Il est essentiel au dimensionnement de l'épaisseur des couches de la superstructure d'une chaussée.

Les facteurs d'influence suivant sont déterminants pour le dimensionnement :

- **La sollicitation du trafic** : T1 : Très légers ; T2 : léger ; T3 : moyen ; T4 : Lourd ; T5 : très lourd ; T6 : extrêmement lourd.
- **La classe de portance** (S0, S1, S2, S3, S4) : On peut la déterminer par le module E_{v2} (module de rigidité à la plaque), et par le coefficient.

Le tableau suivant représente la classe de la portance en fonction de la valeur du CBR.

Tableau 4: Classes portantes du sol [17]

Classes de portance	CBR [%]
S0 portance très faible	CBR < 3
S1 portance faible	3 < CBR < 6
S2 portance moyenne	6 < CBR < 12
S3 portance élevée	12 < CBR < 25
S4 portance très élevée	25 < CBR

Selon les spécifications du marché, les résultats pourraient être exploités comme suit :

- Les matériaux utilisés en plate-forme devraient avoir : $10 < I.CBR < 30$ (sol de type S3 et S4)
- Les matériaux utilisés en couche de fondation : $CBR > 30$ (sol de type S5)
- Et les matériaux pour couche de base présentent : $CBR > 80$
- Le gonflement relatif Gr doit être inférieur à 2%

Il existe d'autres classes de portance selon le module à la plaque EV2. Le tableau suivant montre cette relation.

Tableau 5: Classe portante selon le module EV2 [11]

Classe	Module EV2 (Mpa)
PF1	20 à 50
PF2	50 à 120
PF3	120 à 200
PF4	210 et plus

Ce module correspond à la portance du sol en place, obtenu à partir de l'essai à la plaque. Une corrélation entre ce module par rapport à l'indice CBR en laboratoire est :

$$EV2 = 5 \times ICBR \quad (1)$$

II.4 – Classification des sols

Pour une bonne communication entre les ingénieurs et les mécaniciens du sol, divers systèmes de classification coexistent à travers le monde. La classification ASTM (American Society for Testing and Materials) continue d'être utilisée ici et là. La méthode de classification utilisée dans ce travail est le

système français du Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme, couramment appelé GTR qui comporte une classification précise et complète d'une grande variété de matériaux.

Les grandes familles de matériaux de cette classification sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6: Classification GTR [11]

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50mm$ et passant à $80\mu m > 12\%$ ou passant à $80\mu m \leq 12\% +$ VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	

D_{max} = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments)

Commentaire :

- Les sols fins sont caractérisés par : $D_{max} \leq 50mm$ et tamisât à $80\mu m > 35\%$, ils sont de classe A (A₁, A₂, A₃, A₄) dans la classification GTR.
- Sols sableux et graveleux avec fines : $D_{max} \leq 50mn$ et tamisât à $80\mu m < 35\%$, ils sont de classe B (B₁, B₂, B₃, B₄, B₅, B₆).
- Sols comportant des fines et des gros éléments : $D_{max} \leq 50mm$ et tamisât à $80\mu m > 12\%$ ou si le tamisât à $80\mu m \leq 12\%$ dont VBs est supérieure à 0.1, ils sont de classe C (C₁, C₂).
- Sols comportant des fines et des gros éléments : $D_{max} \leq 50mm$ et tamisât à $80\mu m > 12\%$ ou si le tamisât à $80\mu m \leq 12\%$ dont VBs est supérieure à 0.1, ils sont de classe C (C₁, C₂).
- Sols insensibles à l'eau : $D_{max} \leq 50mn$ et tamisât à $80\mu m \leq 12\%$ et VBs ≤ 0.1 , ils sont de classe D (D₁, D₂, D₃).

Pour une classification plus poussée, on y ajoute le paramètre de l'état hydrique. L'échantillon du sol pourrait donc être appelé [11] :

- Sol à l'état humide ou h ;
- Sol à l'état Très humide th ;
- Sol à l'état moyen ou m ;
- Sol à l'état sec ou s ;
- Sol à l'état Très sec ou ts ;

Le tableau synoptique selon la norme NF P 11-300, résume et facilite la classification primaire des matériaux basée sur leur granulométrie, leur argilosité et leur nature pétrographique.

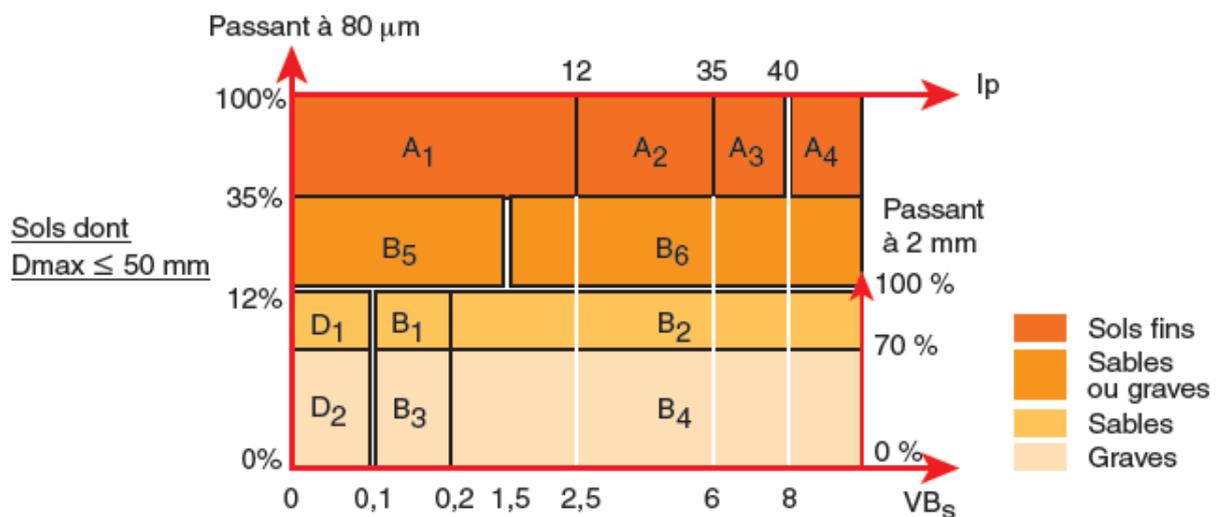


Figure 5: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature [13]

Commentaire

Ce type de tableau détermine les classes des sols à partir de l'indice de plasticité I_p , la valeur au bleu VB_s et les pourcentages des passants à 2mm et à 80µm pour la dimension maximale D_{max} inférieure ou égale à 50mm.

La classification des sols fins avec des paramètres détaillés pourrait être visualisée dans l'annexe 4.

CHAPITRE III. GENERALITES SUR LES TRAITEMENTS DES SOLS

III.1 – Les techniques et produits de traitement ou l'amélioration des sols

La stabilisation des sols peut être généralement définie comme la modification, préservation ou amélioration d'une ou plusieurs de ses propriétés. Ce traitement consiste à modifier les caractéristiques géotechniques d'un sol en place, ou non, par adjonction soit d'une fraction granulométrique de même nature, soit d'un liant hydraulique ou carboné. L'idée générale est d'augmenter la cohésion d'un sol ou sa friction interne suivant les caractéristiques que l'on cherche à améliorer.

Les conditions générales d'utilisation des sols et des matériaux naturels doivent satisfaire à certaines exigences [13] [14] [15] [8] :

- Teneurs en eau compatible avec l'exécution de terrassements et du compactage
- Gonflements faibles
- Cohésion et résistance à la compression
- Portance et résistance mécanique suffisantes leur permettant de supporter les contraintes répétées dues au trafic
- Insensibilité à l'eau
- Dimension limitée des gros éléments à 40mm pour les matériaux de couche de base et à 60mm pour ceux de la couche de fondation pour éviter la ségrégation et faciliter la mise en place.

Lorsque les matériaux ne possèdent pas une ou plusieurs de ces propriétés, il faut recourir à des techniques d'amélioration consistant en traitements physiques et/ou chimiques.

Ce traitement a des impacts sur :

- L'économie : mise en œuvre rapide, moins de moyens nécessaires, peu de matériau mis en décharge car peu de déblai)
- L'Amélioration des propriétés mécaniques : densification du sol, réduction de la teneur en eau, modification de la fraction argileuse, augmentation de la résistance de la rigidité, imperméabilité, homogénéité, vieillissement, durabilité, prédiction de la résistance en fonction du type de sol, etc.

III.2 - Les principales techniques d'amélioration ou de stabilisation des sols

Il existe plusieurs techniques permettant de valoriser les sols possédant des caractéristiques médiocres. Il s'agit de la stabilisation [21] [14] [15] [4] :

- Mécanique (densification par compactage, pré-chargement, ...) ;
- Hydraulique (drainage, rabattement de la nappe, ...) ;
- Électrique (électro-osmose) ;
- Thermique (congélation, cuisson, ...) ;

- Chimique (ajout de produits : chaux, ciment, ...).

Les deux grandes classes de la stabilisation fréquemment utilisées sont :

- La stabilisation chimique ou additive.
- La stabilisation physique ou mécanique ;

La première méthode consiste à ajouter un produit au sol en quantité appropriée, en améliorant les performances par effet de prise et de cristallisation entre les produits mis en contact. La sélection du produit et des dosages dépend de la classification du sol et du degré d'amélioration désiré. Les principaux liants hydrauliques utilisés comme produits de traitement chimique sont : la chaux et le ciment. D'autres exemples de liants sont les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes et les laitiers.

Ces techniques pourraient appliquer par une méthode mixte physico-chimio-mécanique (traitement à la chaux et / ou aux liants hydrauliques suivi des corrections granulaires et du compactage).

La deuxième consiste généralement en une correction granulaire et en une densification des sols au moyen du compactage par l'application d'énergie mécanique permettant l'amélioration de la résistance, la diminution de la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité. La litho-stabilisation fait partie de cette technique, elle améliore la granularité du sol par adjonction d'un certain pourcentage des granulats de classe granulaire variable pour obtenir un matériau présentant de meilleures performances géotechniques.

III.3 - les produits courants pour le traitement des sols

Le traitement à la chaux et au liant hydraulique est ainsi une solution courante d'amélioration des sols en terrassements.

Comme l'eau est le principal responsable des dégâts dans les routes, il existe d'autres produits hydrophobes (drysoil, conaid cbr+, terassil, etc.) qui imperméabilisent le corps de la chaussée, rendent les sols totalement insensibles à l'eau quelles que soient les conditions climatiques et hydrologiques. Ces produits maintiennent les performances mécaniques améliorées aux liants hydrauliques.

III.3.1 - Le traitement des sols à la chaux [16] [15] [14] [4] [8]

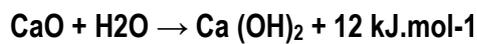
III.3.1.1 - Les différents types de chaux

Il existe deux types de chaux :

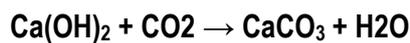
- La chaux vive : c'est le produit direct de la calcination à 900°C de roche calcaire. Le carbonate de calcium CaCO_3 se dissocie alors pour donner de l'oxyde de calcium CaO et du gaz carbonique CO_2 suivant la réaction :



- La chaux éteinte ou hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 : c'est le résultat de la combinaison de la chaux vive avec de l'eau suivant la réaction d'extinction suivante :



La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante (Ca(OH)_2), se carbonater sous l'action du CO_2 atmosphérique (phénomène s'appelle la carbonisation) suivant la réaction :



III.3.1.2 - Caractérisation de la chaux

Une chaux est définie par plusieurs paramètres : sa teneur en chaux libre exprimée sous forme de CaO , sa teneur en MgO , sa granulométrie définie par le tamisât à 2, 0.2 et 0.08 mm et enfin sa réactivité déterminée par l'essai de « réactivité à l'eau » définie par la norme NF P 98-102. Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux.

Tableau 7: Principales caractéristiques de la chaux [16]

Type de chaux	Chaux vive	Chaux éteinte
Formule	CaO	Ca(OH) ₂
Couleur	blanche	blanche
Structure cristalline	cubique	système pseudo-hexagonal
Densité relative	3,4	2,2
Masse volumique apparente (g.cm ⁻³)	0,80 à 1,10	0,40 à 0,64
Masse molaire (g.mol ⁻¹)	56,08	74,10
Solubilité à 20°C	0,125	0,165
pH de la solution saturée à 25°C	12,45	
Réactivité à l'eau	Mesurée par l'essai NF EN 459-2	-

III.3.1.3 - Spécifications de la chaux utilisée au traitement des sols [14]**a. Spécification de la chaux éteinte :**Teneur en CaO libre global $\geq 50\%$ Teneur en MgO $\leq 6\%$ Passant 0.08mm $\geq 90\%$ Teneur en eau libre $\leq 2\%$ **b. Spécification de la chaux vive :**Teneur en CaO libre global $\geq 80\%$ Teneur en MgO $\leq 8\%$ Passant 0.08mm $\geq 50\%$ Passant 0.2mm $\geq 80\%$

Passant 2mm : 100%

Teneur en eau libre $\leq 2\%$

III.3.1.4 - Principe d'action de la chaux sur le sol

L'ajout de chaux provoque une augmentation de la quantité d'ions Ca^{2+} et OH^- en solution dans le sol. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi leurs caractéristiques par différents processus physico-chimiques. On distingue classiquement les actions à court terme et à long terme.

a. Actions à court terme

L'ajout de chaux au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Le choix du type de chaux dépend de la teneur en eau du sol : si le sol est trop humide, la chaux vive (CaO) est utilisée car elle augmente la teneur en solide du sol, d'où une diminution relative de la teneur en eau, elle consomme de l'eau lors de son hydratation, et enfin, elle favorise l'évaporation par la chaleur de la réaction d'hydratation exothermique. Il est admis que chaque centième de chaux vive introduite dans les sols permet de réduire d'environ un centième la teneur en eau. Si le sol est à teneur en eau Proctor, la chaux éteinte, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pourra être utilisée. L'ajout de matière sèche provoque ici une faible diminution de la teneur en eau.

[15] [14] [8]

L'ajout de chaux dans un sol, par hydratation, entraîne l'augmentation des ions Ca^{2+} et OH^- dans le sol. Des échanges cationiques se produisent alors entre les ions absorbés à la surface des particules argileuses et les cations apportés. La capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ont pour effet de réduire la taille de la double couche des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agréger : C'est le processus de floculation. [15] [4]

Cette action entraîne une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers les teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent cette granulation dont la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux.

b. Actions à moyen et long terme

L'apport important d'ions OH^- dans le sol entraîne une augmentation du pH du sol Jusqu'à une valeur proche du pH d'une solution saturée en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, c'est-à-dire environ 12,4. Ce pH fort favorise la dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans les particules de sol. Ces particules en solution réagissent avec le calcium pour former des produits cimentaires : des silicates de calcium hydratés, des aluminates de calcium hydratés, ou des aluminosilicates de calcium hydratés. Ces réactions se regroupent

sous le terme de réactions pouzzolaniques. Ces réactions peuvent durer plusieurs mois, voire des années. [15] [14] [9]

III.3.2 - Le traitement des sols aux liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits ayant la propriété de durcir au contact de l'eau et qui après durcissement conservent leur résistance et leur stabilité même sous l'eau. Ce sont des matériaux qui font l'objet de fabrications industrielles et de contrôles garantissant leur conformité sur normes. Les ciments sont parmi ces liants et la norme de référence de ce produit est la norme Européenne EN 197-1 publiée par AFNOR (Association Française de Normalisation). Il est fabriqué à partir de calcaire, de l'argile, des cendres volcaniques, du Gypse et d'autres additifs par traitement thermique. Il est utilisé selon le type et la nature d'ouvrage. [15]

III.3.2.1 - Rôles des ciments

Le ciment permet de renforcer fortement la structure d'un sol ou d'un matériau. Une quantité minimale de ciment est nécessaire pour produire une action de cimentation significative des grains du matériau qui acquiert ainsi une forte cohésion et corrélativement, après une période de cure suffisante des caractéristiques mécaniques élevées. Cette technique rend possible l'utilisation de matériaux de mauvaise qualité. La stabilisation par le ciment requiert un indice de plasticité inférieure à 30% et pourrait donner lieu à une matière semi-rigide. [4]

III.3.2.2 - Les constituants du ciment

Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des constituants principaux et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium. [15]

Les constituants principaux (> 95 % de la somme des constituants principaux et secondaires) sont :

- Clinker Portland (K) ;
- Laitier granulé de haut-fourneau (S) ;
- Matériaux pouzzolaniques: Pouzzolane naturelle (P), Pouzzolane naturelle calcinée (Q)
- Cendres volantes : Cendre volante siliceuse (V), Cendre volante calcique (W)
- Schiste calciné (T) ;
- Calcaire (L - LL) ;
- Fumée de silice (D) ;

Les constituants secondaires (< 5 % de la somme des constituants principaux et secondaires) sont :

- Les additifs (< 1 % de la somme des constituants principaux et secondaires) ;

- Le sulfate de calcium (l'addition de cette matière a pour objet de réguler le temps de prise du ciment dans certaines limites).

III.3.2.3 - Les différents types de ciments

Les ciments sont classés selon leur composition et on distingue cinq types de ciments courants.

Le tableau suivant présente ces différents types de ciments avec la teneur en clinker et autres constituants principaux.

Tableau 8: Types du ciment courant

Désignation	Notation	Teneur en clinker (%)
Ciment Portland	CPA-CEM I	95 à 100
Ciment Portland composé*	CPJ-CEM II/A	80 à 94
	CPJ-CEM II/B	65 à 79
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 à 64 et 36 à 65% de laitier de haut-fourneau
	CHF-CEM III/B	20 à 34 et 66 à 80 de laitier de haut-fourneau
	CLK-CEM III/C	5 à 19 et 81 à 95 de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 à 90 et 10 à 35% de pouzzolane dont moins de 10% de cendres siliceuses ou fumées de silice.
	CPZ-CEM IV/B	45 à 64 et 36 à 55% de pouzzolane
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 à 64 avec 18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolane
	CLC-CEM V/B	20 à 39 et 31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus

III.3.2.4 - Caractérisation des liants hydrauliques

Sur le plan chimique, le ciment est constitué de silicates et aluminates de calcium dont les deux principaux oxydes sont la chaux (CaO) et la silice (SiO₂). Tels quels, ces oxydes n'ont aucune propriété hydraulique, c'est à dire qu'ils n'ont pas d'aptitude à durcir en présence d'eau. C'est le traitement thermique qui, d'une part provoque la décarbonatation du carbonate de calcium à 900 °C, et d'autre part permet aux oxydes de se combiner entre eux dans le clinker à 1 450 °C pour former de nouveaux composants qui eux, seront hydrauliques (silicates). [15]

III.3.2.5 - Spécification des ciments utilisés au traitement des sols

Tableau 9: Possibilité d'emploi des ciments courants avec différent type de sol [13]

<i>Types de sols</i>	<i>CEM I</i>	<i>CEM II</i>	<i>CEM III</i>	<i>CEM IV</i>	<i>CEM V</i>
Sols pas ou peu argileux (classes A1-B1-B2-B3-B4-B5-D1-D2)	+ ⁽¹⁾	+	+	?	+
Sols argileux prétraités à la chaux (classes A2-A3-B6)	+ ⁽¹⁾	+	?	?	?
Craies (classe R1)	+ ⁽¹⁾	?	?	?	?
Sols calcaires et marno-calcaires (classe R2)	+ ⁽¹⁾	+	+	?	+

+ : a priori adapté

+⁽¹⁾: a priori adapté – Usage à privilégier pour les travaux d'arrière-saison (ces ciments donnent un faible délai de maniabilité), sauf ajout d'un retardateur

? : Étude spécifique nécessaire

III.3.2.6 - Principe d'action des ciments sur le sol

a. Actions à court terme [15] [14]

L'abaissement de teneur en eau résulte uniquement de l'apport de matière sèche. Il est donc très limité. Le traitement au ciment seul ne convient pas pour des sols très humides. Une solution est de les prétraiter à la chaux.

b. Actions à moyen et long terme

La première phase est celle du démarrage de la prise. Elle correspond au délai de maniabilité du mélange. Celui-ci dépend de la nature des constituants principaux du ciment et de leur finesse de mouture, ainsi que de la nature des constituants secondaires et des additifs (retardateurs ou accélérateurs).

La deuxième phase concerne la prise hydraulique, dont la durée dépend principalement de la qualité et de la finesse du ciment.

La troisième phase est celle du durcissement progressif qui s'étale d'un à plusieurs mois. La prise hydraulique s'interrompt quand la température du matériau tombe en dessous de 5 °C environ. La période de traitement et le type de ciment doivent donc être choisis de manière à garantir que le sol traité aura atteint un niveau de résistance mécanique.

Remarque

Plus le sol est argileux, moins en général les résistances sont élevées, compte tenu de la faible proportion d'éléments grenus constituant l'édifice granulaire. En particulier, il n'est pas judicieux d'envisager *a priori* un traitement des sols des classes A2 et A3, avec un liant hydraulique seul. Toutefois, des liants dégageant une importante quantité de chaux au cours de la prise (cas du ciment CPA-CEM I, par exemple) ou de liants comportant une forte proportion de chaux ou de clinker peuvent, dans certains cas, s'avérer efficaces sur ces matériaux, car leur phase hydraulique est renforcée par une prise de type pouzzolanique (de la chaux sur les argiles). En fait, la meilleure solution pour ces sols sera souvent de combiner les actions complémentaires de la chaux et du liant hydraulique en réalisant un « traitement mixte ». En cas de non efficacité, il existe aussi d'autre liant hydraulique spécifique. Il s'agit des liants hydrauliques routiers (LHR).

III.3.2.7 - Liant hydraulique spécifique

Pour faire face au sol plus argileux, des liants hydrauliques distincts des ciments classiques normalisés et dédiés à la construction routière ont été conçus. Ces produits appelés liants hydrauliques routiers (LHR) se sont, depuis, beaucoup développés. [15] [14]

Les constituants de liants hydrauliques sont codés comme suit :

- clinker Portland : K
- laitier granulé de haut-fourneau : S
- laitier d'aciérie à l'oxygène : Sb
- pouzzolane naturelle : P
- pouzzolane naturelle calcinée : Q
- cendres volantes siliceuses : V
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé : Va
- cendres volantes calciques : W
- cendres volantes calciques non éteintes : Wa
- schiste calciné : T
- calcaire : avec teneur en carbone organique < 0,5 %: L
Avec teneur en carbone organique < 0,2 %: LL
- chaux aérienne calcique vive : CL-Q
- chaux aérienne calcique éteinte : CL-S
- chaux hydraulique naturelle : NHL
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : Cs

a. Les différents types des LHR

Certains LHR ont été mis au point pour des graves ou des sables traités, utilisés en assises de chaussée. D'autres l'ont été pour des traitements de sol. Ces derniers peuvent, très schématiquement, être classés en fonction de leur destination principale. [15] [8]

On peut ainsi citer :

- LHR pour traitement de sols fins (limons, loess, etc.) ;
- LHR pour travaux en arrière-saison ;
- LHR pour traitement de matériaux argileux (y compris en substitution du double traitement chaux puis ciment) ;
- LHR pour traitement de craies ;
- LHR pour traitement de calcaires subnormaux ;
- LHR pour travaux de terrassements ;
- LHR à portance rapide.

Les LHR donnent les meilleurs résultats pour certaines opérations de terrassements ou de construction d'assises, tant en termes de facilité d'usage (délai de maniabilité, en particulier) qu'au niveau de performances du mélange final. En outre, certains LHR ont été spécifiquement conçus pour le traitement de matériaux particuliers ou pour atteindre des objectifs de performance à court terme (liant à portance rapide).

III.3.3 – Conformité de traitement

Les critères d'aptitude au traitement d'un sol sont récapitulés dans le tableau suivant. Un sol est déclaré apte au traitement dès lors que son gonflement volumique G_v est inférieur à 5% et que sa résistance à la traction indirecte est supérieure à 0,2MPa. [14]

Tableau 10: Critères de jugement de l'aptitude d'un sol à être traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques [14]

Type de traitement	Aptitude du matériau au traitement	Paramètres considérés	
		Gonflement volumique G_{v7j} %	Résistance en compression diamétrale R_{tb} MPa
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_{v7j} \leq 10$	$0,1 \leq R_{tb} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique
	Douteux	$5 \leq G_{v7j} \leq 10$	
	Inadapté	≥ 10	

- Dans les cas désignés comme « inadapté » : la technique est en principe à abandonner
- Dans les cas désignés comme « douteux » : la décision de persévérer dans la solution « traitement » dépend du contexte particulier du chantier. [14]

Remarque : Les valeurs proposées dans ce tableau sont issues d'une expérience récente et pourront être ajustées à l'avenir au vu des éléments apportés par la généralisation de la pratique de l'essai. [14]

CONCLUSION SUR LES ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Les études bibliographiques révèlent que le site d'étude est une zone pluvieuse et à la merci du cyclone presque toute l'année.

La plupart des routes en terre sont en mauvaises états et nécessitent une amélioration pour relancer les activités économiques des milliers de personnes.

Techniquement, les études bibliographiques ont montré aussi qu'on peut mesurer les mauvais états de routes en terre par les études de propriétés chimiques, minéralogique et géotechniques du sol pour pouvoir contribuer aux améliorations par le biais de divers techniques et produits de traitement.

PARTIE II- ETUDES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION

Comme ce travail a pour objectif d'apporter une amélioration possible d'une route en terre, trois (03) échantillons de terre sur 3 sites différents ont été prélevés puis analysée au laboratoire Colas Madagascar pour l'étude des propriétés géotechniques et au laboratoire de l'Office des Mines et des Industries Stratégiques (OMNIS) pour les propriétés chimiques et minéralogiques.

CHAPITRE IV- ETUDES PRELIMINAIRES

IV.1 - Travaux de terrain

IV.1.1 - Choix de la zone d'étude

IV.1.1.1 - Reconnaissance de terrain

Avant de choisir la zone d'étude, des reconnaissances de terrain ont été faites d'Antalaha à la commune rurale d'Ampanavoana dans le Fokontany de Fampotakely sur un trajet de 115km.

Les principales cibles sont les 3 déviations le long de cette RIR.

Ces déviations sont :

- Mahatsara – Ambodipont
- Antsampanan'Ambalabe-Ambalabe
- Ambalabe – Antsampanan'lhavenja

Le choix du terrain repose sur la gravité des problèmes, la distance par rapport à la ville et d'autres comme le potentiel économique.

IV.1.1.2 - Identification des problèmes

Les problèmes rencontrés dans la première déviation de Mahatsara à Ambodipont sont déjà cités à la partie I dans le chapitre II. Elle est le plus près de la ville d'Antalaha et présente beaucoup plus de problèmes.

La deuxième déviation d'Antsampanan'Ambalabe à Ambalabe traverse une bande de sable stable qui favorise l'accessibilité de la route toute l'année.

Quant à la troisième déviation entre Ambalabe et Antsampanan'lhavenja se trouve une partie de la route en digue très argileux qui est inaccessible en période de pluie.

L'identification de ces problèmes a été obtenue à partir de l'observation directe sur le terrain, de quelques enquêtes auprès de villageois et aux usagers de cette route.

IV.1.2 – Echantillonnage

Après avoir déterminé la zone d'étude et identifié les problèmes, des prélèvements d'échantillons du sol ont été effectués le long de la première déviation dans trois points distincts (ES1, ES2 et ES3) suivant la zone à risque et la variation de la formation géologique du terrain. L'échantillonnage s'est effectué sur le

terrain naturel par sondage à la pelle avec une tranchée rectangulaire et une profondeur supérieure à la couche de terre végétale. L'échantillonnage s'est effectué en deux voyages. En générale, l'échantillon ES1 pèse environ 130kg, ES2 pèse 100kg et ES3 pèse 135kg.

• Coordonnées géographiques

Le tableau suivant montre les coordonnées géographiques des point d'échantillonnages le long de cette tronçon de route en terre.

Tableau 11: Coordonnés géographiques des points d'échantillonnages

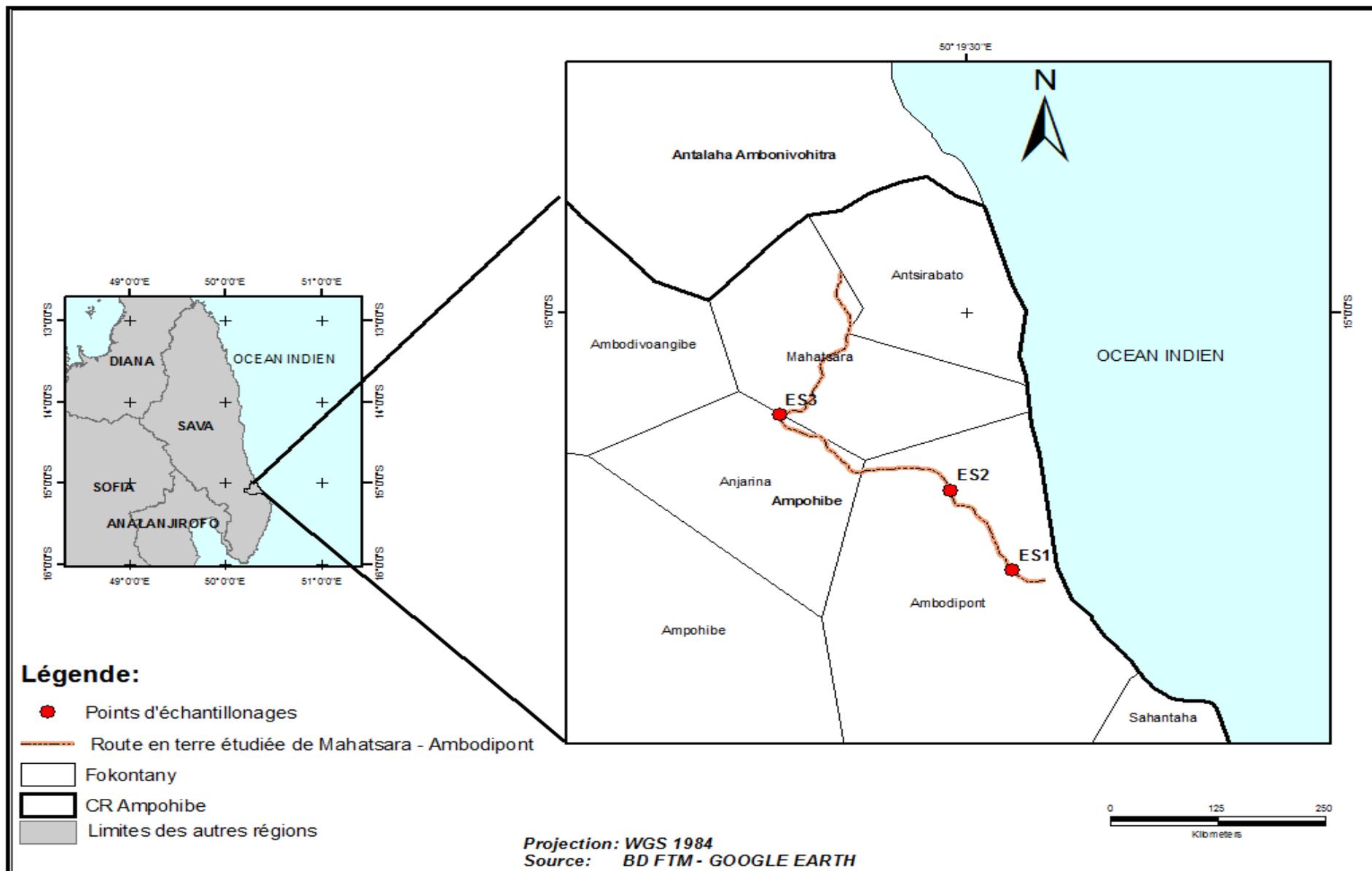
Points d'échantillonnages	Localisation		Altitude
	Latitude	Longitude	
ES1 – ES1/A	15° 1'37.80"S	50°19'44.70"E	21m
ES2 – ES2/A	15° 1'7.40"S	50°19'25.00"E	34m
ES3 – ES3/A	15° 0'38.80"S	50°18'30.20"E	13m

Pour bien situer la zone d'étude, les points ES1, ES2 et ES3 le long de cette route dans ce tableau seront placés dans la photo satellite prise sur Google Earth ci-dessous suivie de quelques indications.

Le point ES1 se trouve dans le village d'Ambodipont et ES3 se situe aux environs du pont Mahatsara.

La ligne rouge marque le tracé de cette route.

LOCALISATION DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGES



Carte 5: Localisation des points d'échantillonnages

D'autre représentation de la localisation des points d'échantillonnages s'est aussi effectuée à partir de l'image satellite prise sur Google Earth dans la photo suivante.



Photo 11: Sites d'échantillonnages entre Mahatsara et Ambodipont

• Coupe de sondage

La figure 6 montre une coupe de sondage des points d'échantillonnage.

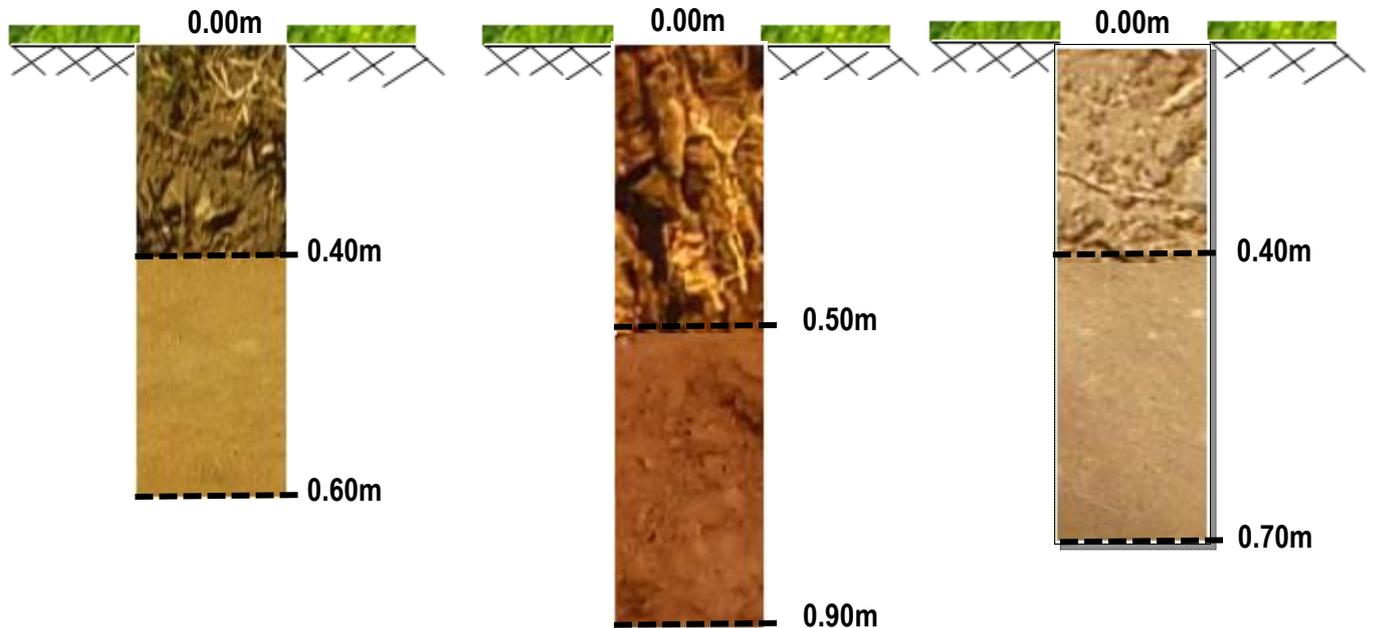


Figure 6: Coupe de sondage des points d'échantillonnages

Commentaire

- Le cas du point d'échantillonnage ES1 : la couche de terre végétale composée de la couverture du sol et le maximum des matières organiques s'étend de 0.00m à 0.40 m de profondeur. Le bon sol à prélever en géotechnique se trouve donc à partir de 0.40m de profondeur. Le prélèvement s'effectue jusqu'à 0.60m. Ce point se situe à une altitude de 21m par rapport au niveau de la mer.

- Le cas du point d'échantillonnage ES2 : la couche de terre végétale composée du sol et le maximum des matières organiques s'étend de 0.00m à 0.50 m de profondeur. Le bon sol à prélever en géotechnique se trouve donc à partir de 0.50m de profondeur. Le prélèvement s'effectue au pied de talus bordant la route jusqu'à 0.90m de profondeur. Ce point se situe à une altitude de 34m par rapport au niveau de la mer.

- Le cas du point d'échantillonnage ES3 : la couche de terre végétale composée du sol et le maximum des matières organiques s'étend de 0.00m à 0.40 m de profondeur. Le bon sol à prélever en géotechnique se trouve donc à partir de 0.40m de profondeur. Le prélèvement s'effectue au bord de la route jusqu'à 0.70m de profondeur. Ce point se situe à une altitude de 13m par rapport au niveau de la mer.

- Le prélèvement est précédé d'un débroussaillage puis d'un décapage des terres végétales.



Photo 12: Débroussaillage

Deux types d'échantillons ont été prélevés sur un même point. L'un en sac plastique est destiné pour l'analyse géotechnique et l'autre en sachet hermétique destiné pour la teneur en eau naturelle, l'analyse chimique et minéralogique.



Photo 13 : Echantillonnage

IV.1.3 – Cartographie de la zone d'étude

Pour situer le point d'échantillonnage dans une carte, des coordonnées géographiques avec l'altitude correspondant ont été prise à l'aide d'un GPS (Cf. tableau 11 page 47). L'emplacement de ces coordonnées dans une carte se fait à l'aide d'un outil SIG comme le logiciel Arc GIS ou les faire entrer directement dans une carte à base de Google Earth ou autres.

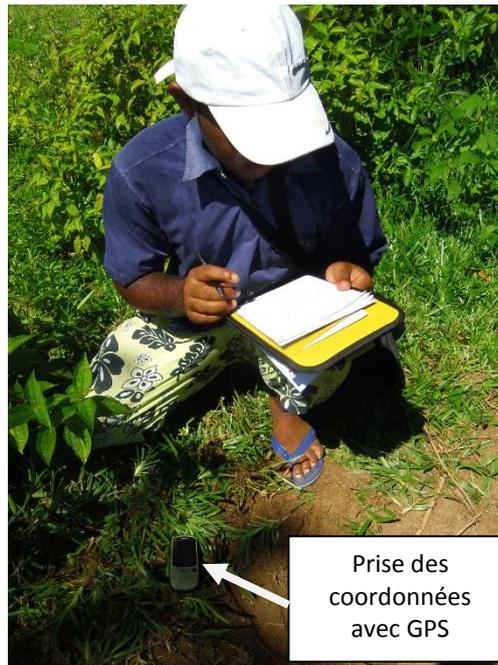


Photo 14: Prise des coordonnées avec GPS

IV.1.4 – les matériels utilisés

Ces travaux de terrains nécessitent des matériels comme :

Pelle, double décamètre, sachet hermétique, sac en plastique, marker, GPS, barre à mine.

IV.1.5 – Transport

Ces échantillons venant d'Antalaha seront transportés dans le laboratoire Colas Madagascar à Antananarivo pour les essais géotechniques et dans le laboratoire de l'OMNIS pour les analyses chimiques et minéralogiques.

IV.2 - Travaux de laboratoire

Pour quantifier les comportements d'un sol et contribuer à son amélioration, des analyses en laboratoire sont nécessaires sur les trois échantillons prélevés ES1, ES2, ES3. Ces travaux de laboratoire consistent donc à l'analyse chimique, minéralogique et géotechnique. Comme ce présent mémoire vise à l'amélioration de la durabilité des routes en terre, des essais d'aptitudes aux produits de traitement et des identifications géotechniques de ces sols traités seront faites.

Les analyses chimiques effectuées :

- Le dosage de la Silice (SiO_2) ;
- Le dosage des Oxydes d'Aluminium (Al_2O_3) ;
- Le dosage des Oxydes de Fer (Fe_2O_3) ;
- Le dosage des Oxydes de Titane (TiO_2) ;

- Le dosage de l'Oxyde de Calcium ou chaux libre (CaO) ;
- Le dosage en Oxyde de Magnésium (MgO) ;
- La détermination de la Perte au feu ;
- La détermination de la teneur en matière organique ;
- Détermination du pH avant et après traitement.

Les analyses minéralogiques :

- Observation au microscope optique ;
- Détermination des minéraux argileux par la méthode de Casagrande.

Les essais physiques et géotechniques des sols avant traitement :

- La détermination de la teneur en eau ;
- La détermination de la masse volumique des particules solides ;
- Essai au gonflement libre ;
- Analyse granulométrique ;
- La détermination des limites d'Atterberg
- L'essai au bleu de méthylène ;
- Essai Proctor modifié ;
- Essai CBR ;
- L'équivalent de sable.

Les essais physiques et géotechniques des sols après traitement :

- La détermination de la teneur en eau avant essai ;
- Analyse granulométrique ;
- La détermination des limites d'Atterberg ;
- L'essai au bleu de méthylène ;
- Essai proctor ;
- La détermination de la portance du sol ;
- Essai d'aptitude au traitement ;
- La détermination de la résistance et module d'élasticité en traction indirecte.

CHAPITRE V- METHODES DE CARACTERISATION DES SOLS

V.1 - Détermination des propriétés chimiques [20]

Les caractérisations chimiques se sont effectuées par la détermination des oxydes et hydroxydes, de la perte au feu, de la matière organique, du pH et de la capacité d'échange cationique CEC à partir de la valeur au bleu de méthylène VBS.

V.1.1 - La fusion alcaline et dosage de la silice

Elle précède la détermination des pourcentages des divers oxydes qui constituent l'échantillon. Les silicates constituent avec la silice libre généralement sous forme de quartz, la majorité des espèces constitutives des roches. Ils sont très difficilement attaqués par les agents classiques tels les acides, mais à partir de 800°C, ils réagissent avec les carbonates. D'une manière très schématique, la réaction serait la suivante :



R = métal

A = alcalin

Si on reprend par un acide étendu le produit de cette réaction, on aboutit à la décomposition des carbonates en sels métalliques avec dégagement de CO₂ et à la décomposition des silicates alcalins et SiO₂ qui est très peu soluble.

Il est impossible de filtrer cette partie de la silice, pour récupérer sa totalité, on doit évaporer à sec le résultat de la fusion alcaline par une résolubilisation ultérieure des sels métalliques. On obtient une silice non colloïdale qui peut être filtrée.

V.1.2 - Dosage des hydroxydes

L'essai consiste à déterminer la teneur en alumine, en oxyde de fer et en oxyde de titane. Après séparation de la silice, on isole par précipitation dans le filtrat F1 la somme des hydroxydes. Elle se fait par addition d'ammoniaque. Les ions Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺ restent en solution.

V.1.3 - Dosage de Fe₂O₃

L'essai consiste à faire le dosage volumétrique à l'EDTA (Éthylène Diamine Tétra-Acétique), en utilisant un pH-mètre pour le contrôle du pH pendant le dosage.

V.1.4 - Dosage de TiO₂

Le dosage en TiO₂ s'est effectué par colorimétrie après avoir préparé la solution étalon composée de l'oxyde de titane TiO₂ selon une méthode choisie.

V.1.5 - Dosage de Al₂O₃.

Le pourcentage de Al₂O₃ est déduit par différence de la somme des hydroxydes avec la somme de TiO₂ et Fe₂O₃.

$$\%Al_2O_3 = \% \sum OH - \%(TiO_2 + Fe_2O_3) \quad (2)$$

V.1.6 - Dosage de CaO

Le dosage de CaO est effectué à partir du filtrat F3 obtenu lors du dosage des hydroxydes. Le calcium est précipité sous forme d'oxalate de calcium insoluble.

V.1.7 - Dosage de MgO

Le magnésium est précipité sous forme de phosphate ammoniaco-magnésien. Par calcination, cet orthophosphate est transformé en pyrophosphate selon la réaction :



On pèse le précipité obtenu et on a le rapport :

$$\frac{2MgO}{P_2O_7Mg_2} = 0.3621 \text{ d'où } P_{MgO} = \frac{0.3621 \times P_{P_2O_7Mg_2}}{2} \quad (3)$$

P_{MgO} est équivalent à la masse du résidu après calcination

V.1.8 - La mesure du pH [4]

La mesure du pH de l'échantillon a nécessité une certaine préparation. Pour cela 1 g d'échantillon a été dissout dans 4 ml d'eau distillée. Le mélange obtenu a été trempé dans l'eau pendant 24h et été agité pendant 15min afin d'avoir une solution homogène. Les pH ont été mesurés sur ces différentes solutions à l'aide du pH-mètre.

V.1.9 – Détermination de la perte au feu

- Prendre 0,5g d'échantillon inférieure à 80µm et l'étuvé à 110°C pendant 4h.
- On obtient la masse m_1
- L'échantillon étuvé à 110°C sera calcinée à 1000°C pendant 4h et on obtient la masse m_2 .
- La perte au feu PF s'exprime par la relation :

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

m_1 : Masse de la matière première étuvée à 110°C

m_2 : Masse de la matière première portée à 1000°C dans un four après étuvage à 110°C.

V.1.9 – Détermination de la capacité d'échange cationique CEC et de la Surface spécifique Ss

Déterminer la CEC consiste à mesurer un paramètre (quantité de cation saturant fixe) caractérisant un état d'équilibre entre l'échantillon de sol et un environnement expérimental donné. Les valeurs obtenues sont fonction du milieu (cation saturant, pH, ...) ainsi que des conditions de réalisation influençant le rendement des réactions d'échange. Trois méthodes sont proposées dans la présente norme : - la méthode à l'acétate d'ammonium (article 3) ; - la méthode au chlorure de cobaltihexammine (article 4) ; - la méthode à l'oxalate d'ammonium (article 5). [33]

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer indirectement ces deux paramètres. Connaissant la masse molaire du bleu de méthylène, et en admettant que le bleu est entièrement adsorbé sous forme monovalente (Clément, 1988), la capacité d'échange cationique de l'argile est déterminée par la relation suivante [34] :

$$CEC (meq/100g) = \frac{V_{BS} (g/100g)}{374} \times 1000 \quad (5)$$

Pour déterminer la surface spécifique totale, on considère que les molécules de bleu sont disposées d'une façon telle que la surface couverte est de 130 Å² par molécule (les molécules de bleu de méthylène sont disposées parallèlement aux couches d'argile et forment une couche monomoléculaire). La surface spécifique totale est donnée par la relation suivante [34] :

$$Ss (m^2/g) = V_{BS} \times \frac{6,023 \cdot 10^{23} \times 130 \cdot 10^{-20}}{374 \times 100} = 20,93 \times V_{BS} (g/100g) \quad (6)$$

V.2 - Détermination des propriétés minéralogiques

Les caractérisations minéralogiques se sont effectuées par l'observation microscopique de chaque fraction granulaire du sol et la détermination des types de minéraux argileux constituant ces échantillons s'est effectuée à partir de méthode de Casagrande. Ces fractions granulaires observées au microscope optique sont les refus du tamis de 2,5mm, 1mm, 0,5mm et de 0,1mm.

V.3 - Détermination des propriétés géotechniques

V.3.1 - Analyses granulométriques [22]

V.3.1.1 - But de l'essai

Pour déterminer la distribution granulaire de ces échantillons du sol étudiés, une analyse granulométrique par tamisage et par sédimentation a été réalisée respectivement selon les normes NF P94-056 et NF P94-057.

L'analyse granulométrique a pour but de :

- déterminer le diamètre des grains qui constituent un sol et un granulat ;
- déterminer les proportions relatives des différentes fractions granulométriques, exprimé en pourcentage de la masse total ;
- apprécier les qualités drainantes et la sensibilité à l'eau des matériaux ainsi que leur aptitude au compactage ;
- classer les sols et les matériaux rocheux selon leurs classes granulaires.

a. Principe de l'essai

Cet essai consiste, à prendre un échantillon du sol ou des granulats selon la dimension maximale des grains (avec une prise = $200 \cdot D_{max}$). Dans le cas de l'analyse granulométrique à sec, l'échantillon sera tamisé à l'aide d'une série de tamis emboîtés les uns aux autres après lavage et séchage à 105°C pendant environ 24h. Les dimensions de mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon est placé dans le tamis supérieur et les vibrations appliquées aux tamis répartissent les grains dans les différents tamis selon leur grosseur. Le matériau retenu dans un tamis donné sera pesé : c'est « le refus ». À partir du refus, on peut déduire la masse du matériau passant à travers ce même tamis. Cette dernière masse s'appelle le « tamisât » ou le « passant ».



Photo 15 : Tamisage



Photo 16: pesage du refus

Pour le sol dont le pourcentage des fines est supérieur à 50%, la méthode par sédimentation sera nécessaire. Elle consiste à laisser une suspension des particules inférieures à 80 μm , séparées du reste du sol par tamisage ; se déposer dans une éprouvette pleine d'eau additionnée d'un défloculant. Plus les grains sont fin, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de Navier Stokes sur la vitesse du chute des particules sphériques dans l'eau. La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre équivalent.



Photo 17: sedimentometrie



Photo 18: mesure de la densité

V.3.2 - Les limites d'Atterberg [23]

La détermination des **limites d'Atterberg** a été réalisée selon la norme NF P 94-051, elle se fait uniquement sur les éléments fins du sol passant à travers le tamis de maille 400 μm .

Cet essai a pour but :

- de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau.
- de faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance.

V.3.2.1 - Principe de l'essai

L'essai consiste à faire varier la teneur en eau de la fraction de sol passant au tamis 0,40mm et en observant sa consistance pour déterminer la limite de liquidité WL et la limite de plasticité Wp.

Cet essai s'effectue en deux phases :

- La recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans la pâte du sol disposée dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 15 à 25 chocs : **Détermination de la limite de liquidité WL.**



Photo 19: préparation de l'échantillon



Photo 20: Malaxage et séchage



Photo 21: Recherche de la limite de liquidité

- La recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol environ de 10cm de long et de 3mm diamètre, confectionné manuellement, se casse lorsqu'on le soulève : **Détermination de la limite de plasticité W_p**



Photo 22: Détermination de la limite de plasticité

V.3.3 - Valeur de bleu d'un sol [24]

On appelle «valeur de bleu VBS d'un sol, la quantité en gramme de bleu de méthylène adsorbé par 100g de sol ($D \leq 5\text{mm}$).

V.3.3.1 - But de l'essai

L'essai au bleu de méthylène a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. C'est aussi un essai simple et rapide qui permet d'évaluer indirectement la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique développée par les minéraux argileux (S_s).

V.3.3.2 - Principes de l'essai

A la prise d'essai agitée dans de l'eau, on injecte progressivement des doses de 5 ml d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées (surface externe et interne des particules présentant un déficit de charge). Après chaque injection, une goutte est prélevée et déposée sur un papier filtre. Le test devient positif lorsque l'auréolé, d'abord incolore, demeure bleu clair pendant 5 minutes. La valeur de bleu est la quantité de solution injectée rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol.



Photo 23: Essai à la tâche

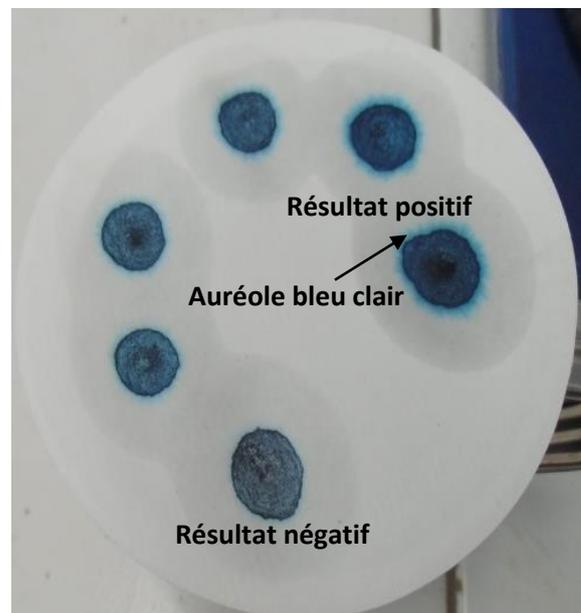


Photo 24: Auréoles

V.3.4 - Masse volumique des particules solides [25]

La masse volumique des particules solides ρ_s est le quotient de la masse de ces particules solides (m_s) par leur volume V_s . Elle est utilisée pour déterminer l'indice des vides, le degré de saturation, la porosité et pour la préparation des éprouvettes stabilisées.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (7)$$

ρ_s est exprimée en T/m^3 (ou en Kg/m^3 ou g/cm^3).

V.3.4.1 - Principe de l'essai

L'essai s'effectue selon la norme NF P94-054 et comporte :

- d'une part la détermination de la masse des particules solides par pesée ;
- d'autre part la mesure du volume de ces particules obtenues par pesée du pycnomètre avec le matériau immergé et totalement désaéré et en faisant la différence avec la masse du pycnomètre uniquement rempli d'eau.



Photo 25: Pesage échantillon avec pycnomètre

La valeur de ρ_s est essentiellement utilisée pour :

- situer la courbe Proctor par rapport aux courbes de degré de saturation ;
- calculer la porosité ou l'indice des vides d'un matériau.

V.3.5 - Essai de Gonflement libre

10cc de sol tamisé à 0.4 mm sont versés dans une éprouvette graduée. On remplit d'eau l'éprouvette et on mesure la variation de hauteur du sol imbibé. Le gonflement libre FS est le rapport entre la variation de volume et le volume initial.

V.3.6 - La teneur en eau du sol [26]

La détermination de la teneur en eau naturelle (W_{nat}) d'un matériau est fait à partir de l'échantillon intact, remanié ou reconstitué qui n'a subi aucune modification lors du prélèvement sur site, du transport et de la conservation.

La mesure de la teneur en eau d'un sol, d'un granulat ou d'un matériau de façon plus générale est une action des plus courantes en géotechnique et également des plus fondamentales. Cette valeur permet en effet d'exprimer beaucoup d'autres valeurs en les ramenant à une expression de masse sèche.

Le principe de l'essai est le suivant :

La teneur en eau d'un matériau correspond à la masse d'eau d'un échantillon ramenée à la masse sèche. Elle s'exprime en pourcent et il s'agit d'une teneur en eau massique. La mesure s'effectue par séchage conventionnellement par évaporation de l'eau dite libre du matériau, ce qui correspond à l'eau qui s'évapore à une température 50°C pour les matériaux riches en matières organiques et supérieure à 100°C pour les autres.

V.3.7 - Essais Proctor normal et modifié [27]

Il s'agit d'un essai pour déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau.

V.3.7.1 - But de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer :

- La teneur en eau optimale d'un sol ;
- La densité sèche maximale.

Le choix de l'énergie de compactage est fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie. Dans ce cas, on distingue deux types d'essais Proctor :

- Essai Proctor normale dont la résistance souhaitée est relativement faible, du type remblai non ou peu chargé ;
- Essai Proctor modifié à forte énergie de compactage E_c .

V.3.7.2 - Principe de l'essai

L'essai consiste à humidifier, à compacter l'échantillon de sol à étudier, à mesurer sa teneur en eau (W) et sa masse volumique sèche ρ_d après compactage correspondante.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau.

L'échantillon est compacté en trois ou en cinq couches d'épaisseurs les plus régulières possibles. Chaque couche est compactée 25 ou 56 fois selon l'énergie de compactage, le moule et la dame utilisés.



Photo 26: Humidification



Photo 27: Malaxage et homogénéisation

Après compactage, on arase la partie supérieure du sol compacté dans le moule de manière à approcher le plus possible le volume réel de l'échantillon. L'échantillon est pesé pour calculer sa masse volumique apparente humide ρ_h puis sa masse volumique sèche ρ_d .

On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\rho_d ; W$) ; à partir des valeurs obtenues, pour chaque échantillon, on trace la courbe, ρ_d en fonction de la teneur en eau W . La courbe ainsi obtenue s'appelle Courbe Proctor.

Les deux grandeurs (teneur en eau correspondant à la masse volumique sèche maximale) sont appelées caractéristiques optimales de compactage.



Photo 28: Sol compacté et arasé



Photo 29: Détermination de pH

V.3.7.3 - Principe de la répartition des coups de dame sur une couche

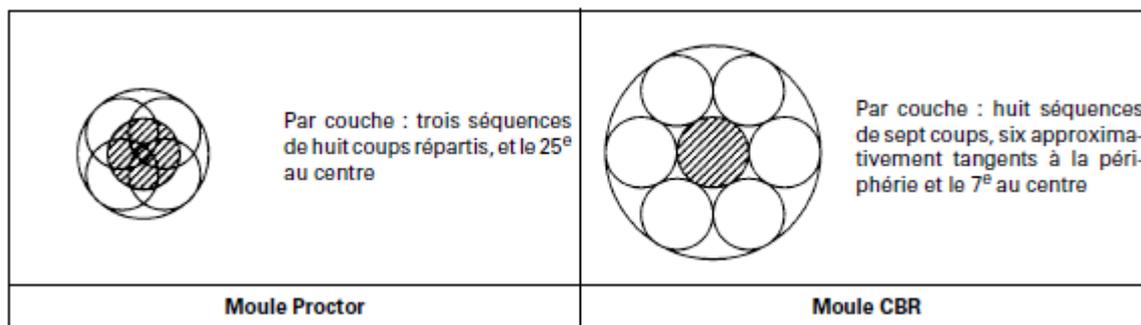


Figure 7: Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche

V.3.8 - Essais CBR [28]

V.3.8.1 - But de l'essai

Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le plus grand rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part.

On distingue 2 types d'essais CBR en fonction des buts fixés :

- L'essai CBR immédiat : détermination de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation en phase de chantier.
- L'essai CBR après immersion : détermination de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé durant 4 jours en générale.

Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes teneurs en eau et/ou soumis à des variations de régime hydrique.

L'essai CBR permet de :

- Evaluer les paramètres de la portance du sol ;
- Déterminer l'aptitude d'un sol à supporter des charges ;
- Proposer un dimensionnement des couches de chaussées par abaques pour une portance compatible avec le trafic existant.

V.3.8.2 - Principe et méthodes

L'essai consiste à mesurer la résistance au poinçonnement après compactage d'un certain nombre d'éprouvettes de sol réalisées suivant un processus déterminé (immersion pendant 4 jours dans l'eau ou non).

L'essai consiste à mesurer la résistance au poinçonnement après compactage d'un certain nombre d'éprouvettes de sol réalisées suivant un processus déterminé (immersion pendant 4 jours dans l'eau ou non). On associe de manière quasi systématique l'étude Proctor et l'étude CBR. On détermine la courbe de variation de l'indice CBR immédiat qui caractérise directement la sensibilité à l'eau du sol considéré.



Photo 30: Immersion dans l'eau pendant 4 jours



Photo 31: Poinçonnement

V.3.9 - Essai d'équivalent de sable [29]

Une éprouvette cylindrique ayant été remplie partiellement d'une « solution lavante » destinée à faire flocculer les fines, la prise d'essai humide y est versée et l'ensemble est agité mécaniquement selon un mouvement alternatif horizontal. On fait alors remonter les fines en injectant dans le sable à l'aide d'un tube de la solution lavante jusqu'à compléter le volume prévu. Après 20 mn de repos, on mesure au mm la hauteur du niveau supérieur du floculat et celle de la partie sédimentée en se repérant sur la base d'un piston taré déposé à sa surface. Cet essai a été réalisé selon la norme NF P 18-598.



Photo 32: Agitateur mécanique

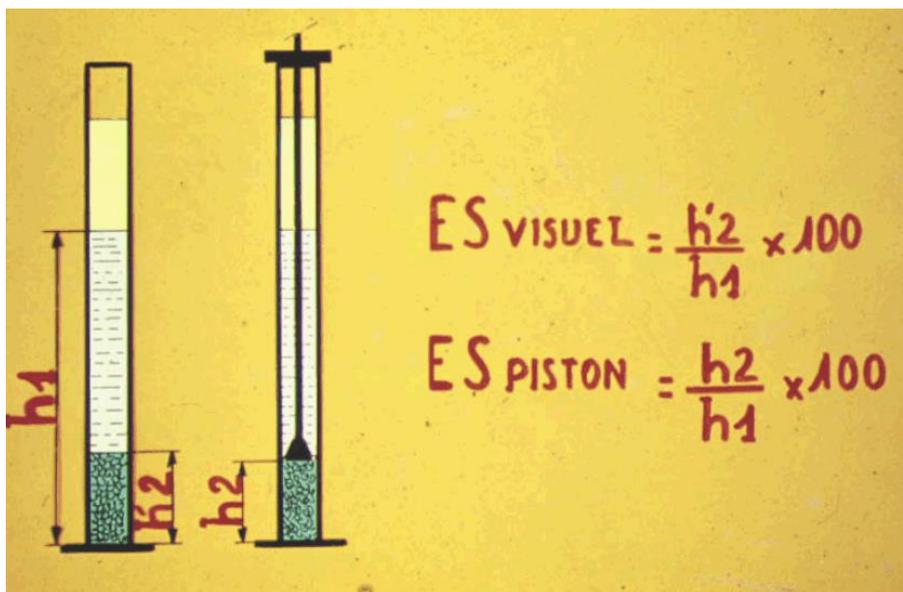


Figure 8: détermination de l'équivalent de sable

Les méthodes de détermination chimiques, minéralogiques et géotechniques nous permettent de caractériser les échantillons étudiés.

CHAPITRE VI. METHODOLOGIE DE TRAITEMENTS DU SOL

VI.1 – Etude des propriétés géotechniques des sols traités ou améliorés

VI.1.1 – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement [30]

L'essai permet de définir l'aptitude d'un sol à une formulation de traitement donnée dans un délai court (7 jours) : les conditions de conservation (immersion à 40°C) conduisent rapidement à une insensibilité à l'eau des sols traités résultant de la floculation des argiles et de la prise du ciment. L'essai d'aptitude au traitement permet alors de vérifier si des agents chimiques, organiques ou minéraux, peuvent nuire à la solidification. Cependant, ces conditions de cure sont extrêmes en comparaison de ce que peut subir le matériau dans l'environnement.

VI.1.2 – Confection et conservation des éprouvettes [30] [31] [32]

Pour les tests d'aptitude au traitement, pour chaque échantillon, 6 éprouvettes cylindriques de dimensions 5cm x 5cm (diamètre x hauteur) ont été confectionnées, 3 recouvertes de bandelettes perméables pour la mesure du gonflement volumique (Gv), 3 pour l'essai de résistance en compression diamétrale (Rtb). Elles ont été confectionnées par compression statique à 3KN selon la norme NF EN 13286-53, à la teneur en eau optimale WOPM et à 96% de la masse volumique sèche optimale ρ_{dOPM} .



Photo 33: Eprouvette cylindrique 5cm x 5cm



Photo 34: Epreuve pour Résistance à la compression diamétrale



Photo 35: Epreuve pour essai au gonflement volumique

Après confection, les éprouvettes sont conservées pendant au moins $4h \pm 15min$ pour le traitement aux liants hydrauliques et $3j \pm 4h$ pour le traitement à la chaux seule à $20^\circ C$ dans l'air et immergées dans un bain thermostatique à $40^\circ C$ pendant $7j \pm 4h$.



Photo 36: Bain thermostatique réglé à $40^\circ C$



Photo 37: Imbibition dans l'eau à $40^\circ C$ pendant 7 jours

Les éprouvettes destinées aux mesures de R_{it} ou du module d'élasticité en traction indirect à 28 jours en cure normale (photo 37) ont les mêmes caractéristiques de compactage que les éprouvettes des tests d'aptitude. Les éprouvettes sont conservées dans des moules hermétiques, sans échange avec l'extérieur, à $20^\circ C$.



Photo 38: Conservation de l'éprouvette dans une chambre froide à 20°C pendant 28 jours

La masse du mélange à introduire dans le moule de l'éprouvette s'exprime :

$$M = 1000 V \times \rho_d \frac{100+W}{100} \quad (8)$$

M : masse du mélange à introduire dans le moule de l'éprouvette, en gramme (g) ;

V : volume de l'éprouvette, en millimètres cube (mm³)

ρ_d : masse volumique apparente sèche de l'éprouvette, en méga grammes par mètre cube (Mg/m³)

W : teneur en eau du mélange par rapport à la matière sèche, en pour-cent (%).

VI.1.3 – Le gonflement volumique [30]

Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le gonflement des sols et des roches sont largement répandus. L'action de l'eau sur les minéraux constitutifs des sols et des roches est à l'origine de ce phénomène.

Le volume initial V_i des éprouvettes cylindriques de diamètre \varnothing 5cm et de hauteur h 5cm (5x5) est calculé immédiatement après leur confection, à partir de leurs dimensions déterminées au pied à coulisses. V_i s'exprime :

$$V_i = \frac{1}{4} h_m \pi \varnothing_m^2 \quad (9)$$

Avec h_m en mm, la moyenne de deux mesures de hauteur espacées de 90°

\varnothing_m en mm, la moyenne de trois mesures de diamètre, en haut, au milieu et en bas de l'éprouvette.

Après 7 jours d'immersion totale dans l'eau, les éprouvettes destinées à l'essai de gonflement sont sorties du bain thermostatique, les bandelettes sont retirées et le volume final V_f des échantillons est déterminé par pesée hydrostatique. Après avoir épongé leurs surfaces, elles sont pesées à l'air : masse M_a en g. Elles sont immergées et pesées dans l'eau : masse M_w en g. Soit ρ_w la masse volumique de l'eau ($\rho_w = 1\text{g.cm}^{-3}$).

Alors :

$$V_f = \frac{M_a - M_w}{\rho_w} \quad (10)$$

Finalement le calcul du gonflement volumique est le suivant :

$$G_v(\%) = \frac{V_f - V_i}{V_i} \quad (11)$$



Photo 39: Contrôle de dimension de l'éprouvette après 7 jours d'imbibition

VI.1.4 – Détermination de la résistance en compression diamétrale (R_{tb}) ou résistances à la traction indirecte (R_{it}) par fendage – Essai brésilien. [30] [31] [32]

Le principe de l'essai consiste à effectuer une traction indirecte en appliquant une charge linéaire suivant 2 génératrices diamétralement opposées d'une éprouvette cylindrique 5×5. L'essai est réalisé sous une presse universelle multifonction équipée d'un capteur de force de 50kN avec une vitesse d'application des forces de 0,04kN.s⁻¹. La résistance est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon (F_r en N) en utilisant la formule suivante :

$$R_{it} = \frac{2F_r}{\pi h \phi} \quad (12)$$

Avec R_{it} en MPa, exprimée à $\pm 0,01$ MPa, la résistance à la traction indirecte par fendage de l'éprouvette de mélange traité aux liants hydrauliques

F_r en N, l'effort maximal supporté par l'éprouvette

h en mm, la longueur de l'éprouvette

\varnothing en mm, le diamètre de l'éprouvette

La résistance à la traction correspond à 80% de la résistance à la traction indirecte :

$$R_t = 0,8 R_{it} \quad (13)$$

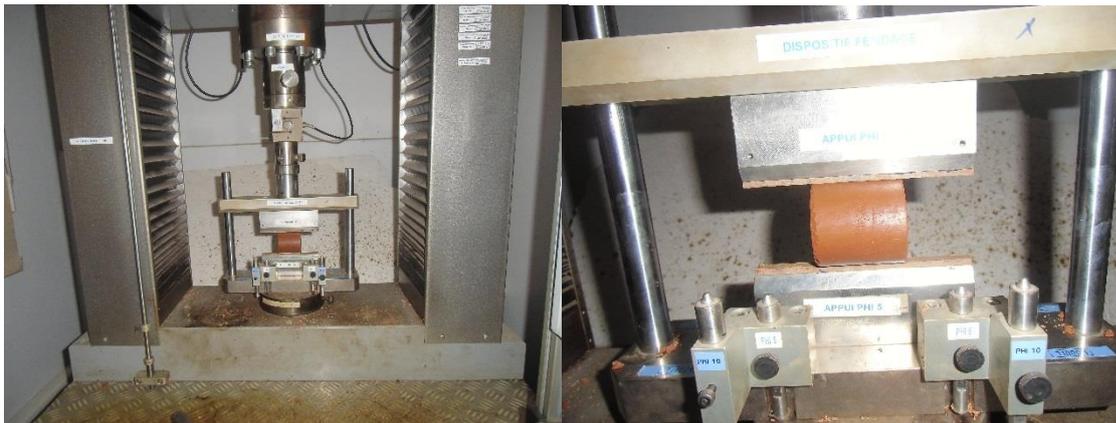


Photo 40: Compression diamétrale après 7 jours d'imbibition dans l'eau à 40°C

VI.1.5 – Résistances et module d'élasticité en traction indirecte

Le déroulement de l'essai s'effectue de la même manière que pour les éprouvettes soumises au test d'aptitude à ceci près que les éprouvettes 5×5 sont équipées d'un extensomètre 4 capteurs $1 \pm 0,0001$ mm permettant de déterminer des déformations diamétrales au cours de l'essai.

$\Delta\varnothing_0$ est l'allongement du diamètre perpendiculaire au plan de rupture de l'éprouvette.

$\Delta\varnothing_{60}$ est la variation d'un second diamètre, orienté de 60° par rapport à la perpendiculaire du plan de rupture.

Le module de déformation E_{it} est estimé à 30% de la contrainte maximale, c'est-à-dire lorsque la charge appliquée $F = 0,3 F_r$ à partir des variations de diamètres $\Delta\varnothing_0$ et $\Delta\varnothing_{60}$.

Le module de Poisson est déterminé à partir de :

$$\nu = \frac{1 + 0,40\nabla_{phi}}{1,73 - 1,07\nabla_{phi}} \quad (14)$$

Le module d'élasticité E_{it} est calculé ainsi :

$$E_{it} = \frac{(0,273 + \nu + 0,726\nu^2) * 0,3F_r}{(h * \Delta\varnothing_0)} \quad (15)$$

Avec ν , le coefficient de Poisson

$$\nu_{phi}, \text{ le rapport } \frac{\Delta\phi_{60}}{\Delta\phi_0}$$

E en MPa, exprimé avec 3 chiffres significatifs, le module d'élasticité en traction indirecte

F_r en N, la force maximale supportée

h en mm, la hauteur de l'éprouvette

$\Delta\phi_0$ en mm, la variation de longueur du diamètre horizontal lorsque F = 0,3F_r

$\Delta\phi_{60}$ en mm, la variation de longueur du diamètre incliné à 60° lorsque F = 0,3F_r

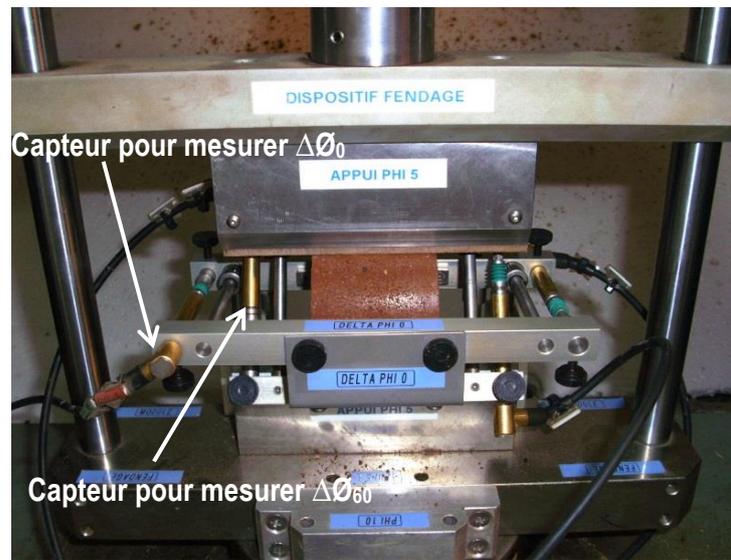


Photo 41: Essai de traction indirecte et module de l'élasticité à 28 jours à 20°C

A partir du couple (R_t ; E) d'un matériau traité, il est possible de lui attribuer une classe mécanique. Elle correspond au numéro de la zone (T0 à T4) où se situe le matériau dans l'abaque de classement du GTS reporté ci-dessous. Les valeurs seuils définissant les limites entre les classes sont reportées dans le tableau suivant. [14]

Tableau 12: Seuils de classes mécaniques des sols traités

Type de sol	Limite T0/T1	Limite T1/T2	Limite T2/T3
Sols fins et sableux	E 2500MPa	E 4000MPa	E 6200MPa
	R _t 0,20MPa	R _t 0,44MPa	R _t 0,80MPa
Sols graveleux	E 3300MPa	E 8200MPa	E 16200MPa
	R _t 0,24MPa	R _t 0,54MPa	R _t 1,02MPa

Les caractéristiques à utiliser pour le dimensionnement sont le module de rigidité E et la résistance en traction directe R_t. S'il n'est pas possible de mesurer la résistance en traction directe, on peut l'estimer à partir d'essais de traction indirecte (par fendage).

CHAPITRE VII- CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

VII.1 - Caractéristiques chimiques

Les analyses chimiques classiques de ces trois (03) échantillons permettent d'obtenir les compositions chimiques données dans les tableaux suivants :

Tableau 13: Résultats des analyses chimiques

Echantillons	%Somme MOH	% Fe ₂ O ₃	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂	% CaO	% MgO	% humidité	% MO	%PF	pH
1(ES1)	29,39	9,23	1,56	18,60	55,12	0,84	2,60	1,06	7,5	10,32	6.53
2(ES2)	48,72	6,19	1,96	40,57	34,91	0,53	0,16	0,99	5,2	13,07	6.20
3(ES3)	16,13	9,49	0,28	6,36	68,46	1,11	3,18	0,75	4,8	7,21	5.87

Tableau 14: La Capacité d'Echange Cationique et la Surface spécifique

Echantillons	CEC meq/100g	S m ² /g
ES1	2,41	18,84
ES2	4,20	32,86
ES3	1,26	9,84

La Capacité d'Echange Cationique et la Surface spécifique sont obtenues par calcul à partir de la valeur au bleu.

VII.1.1 - Interprétations des résultats chimiques

VII.1.1.1 - Echantillon ES1

L'échantillon contient une importante quantité de silice (55,12%), des quantités appréciables d'alumine (18,60%) et d'oxyde de fer (9,23%). L'oxyde de calcium est en faible teneur (0,84%). Ces résultats laissent penser que le quartz, les aluminosilicates et les minéraux de fer sont prédominants dans l'échantillon étudié.

La faible teneur en oxyde de calcium montre que les composés riches en calcium sont en faible proportion. Par conséquent, ce sol ne devrait pas avoir un problème en cas de traitement au produit riche en phosphate.

La teneur en MgO et en matière organique indiquent que ce sol contient de l'argile fibreuse.

Comme ce sol se trouve sur la zone littorale et parfois affecté par l'intrusion d'eau de mer, la présence d'autres éléments chimiques comme le Chlorure serait donc probable.

La perte au feu de 10,32% s'explique 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. Cette valeur renseigne que ce sol contient des minéraux argileux sensible à l'eau. La présence de ces derniers est confirmé par la CEC de 2,41meq/100g du sol et par sa surface spécifique de 18,84m²/g.

Vis-à-vis de son pH, il s'agit d'un sol faiblement acide et faiblement organique dont la teneur pourrait influencer sur le traitement au liant hydraulique.

VII.1.1.2 - Echantillon ES2

L'échantillon contient une quantité moyenne de silice (34,91%), des quantités très appréciables d'alumine (40,57%) et de l'oxyde de fer (6,19%) qui confèrent à ce sol une couleur rougeâtre. L'oxyde de calcium est en très faible teneur (0,53%). Ces résultats laissent penser toujours que le quartz, les aluminosilicates et les minéraux de fer sont aussi prédominants dans l'échantillon étudié. La faible teneur en oxyde de calcium montre que les composés riches en calcium sont en faible proportion.

Par conséquent, ce sol ne devrait pas avoir un problème en cas de traitement au produit riche en phosphate.

La perte au feu de 13,07% s'explique 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. Cette valeur renseigne que ce sol contient beaucoup plus des minéraux argileux sensible à l'eau. Ces derniers sont confirmés par la CEC de 4,20meq/100g du sol et par la surface spécifique de 32,86m²/g.

Il s'agit aussi d'un sol latéritique faiblement acide et faiblement organique dont la teneur pourrait influencer sur le traitement au liant hydraulique.

VII.1.1.3 - Echantillon ES3

L'échantillon contient une importante quantité de silice (68,46%), des quantités appréciables d'oxyde de fer (9,49%) et d'alumine (6,36%). L'oxyde de calcium est en faible teneur (1,11%). Ces résultats laissent penser que le quartz, les aluminosilicates et les minéraux de fer sont prédominants dans l'échantillon étudié. La faible teneur en oxyde de calcium montre que les composés riches en calcium sont en faible proportion.

Comme ce sol se trouve sur la zone littorale et parfois affecté par l'embrun marin, la présence d'autres éléments chimiques comme le Chlorure serait donc probable.

La perte au feu de 7,21% s'explique 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. Cette valeur nous renseigne sur la faible quantité d'argile dans ES3. Ces derniers sont confirmés par la faible valeur de CEC à 1,26 meq/100g du sol et par la surface spécifique de 9,84m²/g.

Vis-à-vis de son pH, il s'agit d'un sol moyennement acide et faiblement organique dont la teneur pourrait influencer sur le traitement au liant hydraulique.

Les résultats de ces compositions chimiques sont illustrés par le diagramme suivant :

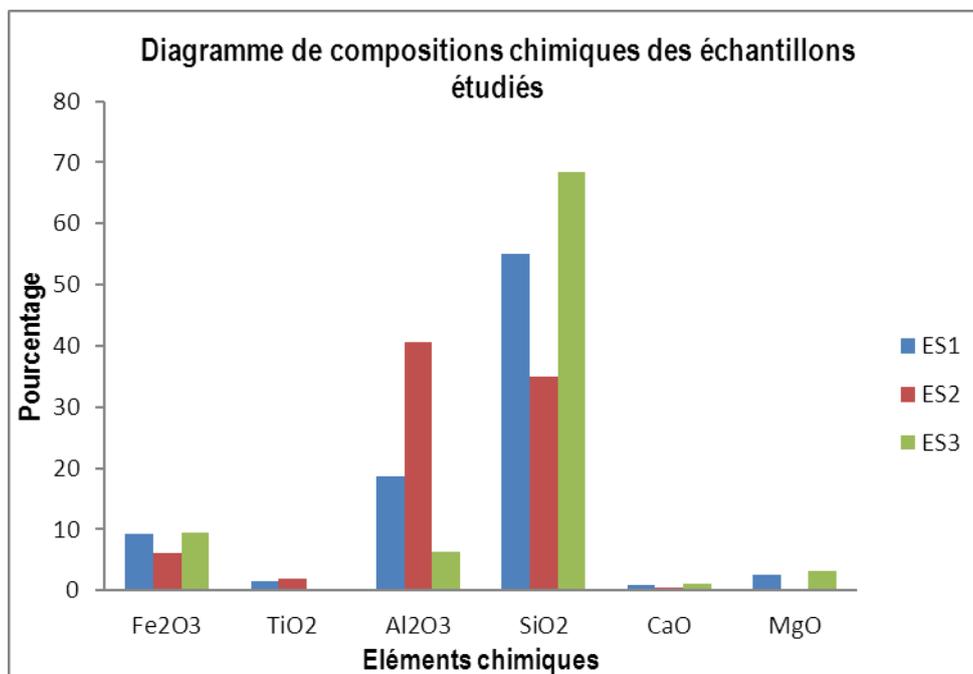


Figure 9: diagramme de compositions chimiques

La teneur en silice est très significative dans ces trois échantillons. Par contre ils ont une teneur très faible en chaux libre, en oxyde de titane et en quantité faible pour l'oxyde de fer. La teneur en oxyde d'aluminium tient le deuxième rang après la silice. L'alumine peut être combinée avec SiO₂ dans les différents types d'argiles contenus dans l'échantillon, ou sous forme d'hydroxyde.

VII.2 - Caractéristiques minéralogiques

VII.2.1 – Résultats de la microscopie optique

VII.2.1.1 - Echantillon ES1

L'observation au microscope optique des prélèvements à partir du refus ponctuel de l'échantillon ES1 permet d'avoir le résultat dans le tableau suivant.

Tableau 15: Résultat d'observation microscopique d'ES1

Distribution granulaire	Fractions	2,5mm	-2,5+1mm	-1+0,5mm	-0,5+0,1mm
	Prise (g)		42,9	19,5	30,0
Minéraux (%) Pourcentage volumétrique	Agrégat : Limonite + Hydroxyde de Fer	100*	20*	7	25
	Silice libre : Quartz+Feldspath	-	5	83	75
	Silice cimenté par Hydroxyde de Fer	-	75	-	-

Remarque : Les masses représentées dans ce tableau sont des prélèvements à partir du refus ponctuel.

Commentaire

- a) La fraction 2,5mm est constituée par des agrégats de limonite et d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure (cf.photo 41).



Photo 42: agrégat de limonite et d'hydroxyde fer dans la fraction 2,5mm d'ES1

- b) La fraction 1mm est constituée de :
- 20% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
 - 5% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;
 - 75% de silice cimenté par des Hydroxydes de Fer.
- c) La fraction 0,5mm est constituée de :
- 7% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
 - 83% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;
 - 10% d'autres minéraux.



Photo 43: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,500 mm d'ES1

- d) La fraction 0,1mm est constituée de :
- 25% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
 - 75% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;



Photo 44: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,1 mm d'ES1

Les silices sont représentées par la couleur claire et les agrégats de limonite, de l'hydroxyde de fer sont de couleur marron, rougeâtre et noir.

VII.2.1.2 - Echantillon ES2

L'observation au microscope optique des prélèvements à partir du refus ponctuel de l'échantillon ES2 permet d'avoir le résultat dans le tableau suivant.

Tableau 16: Tableau : résultat d'observation microscopique d'ES2

Distribution granulaire	Fractions	2,5mm	-2,5+1mm	-1+0,5mm	-0,5+0,1mm
	prise (g)	23,8	16,4	37,5	40,0
Minéraux (%) Pourcentage volumétrique	Agrégat : Limonite+Hydroxyde de Fer	100*	60	20	15
	Silice libre : Quartz+Feldspath	-	40	80	85

Commentaire

- a) La fraction 2,5mm est constituée par des agrégats de limonite et d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure.



Photo 45: Les minéraux représentatifs de la fraction 2,5 mm d'ES2

b) La fraction 1mm est constituée de :

- 60% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
- 40% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;

c) La fraction 0,5mm est constituée de :

- 20% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
- 80% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;

d) La fraction 0,1mm est constituée de :

- 15% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
- 85% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;

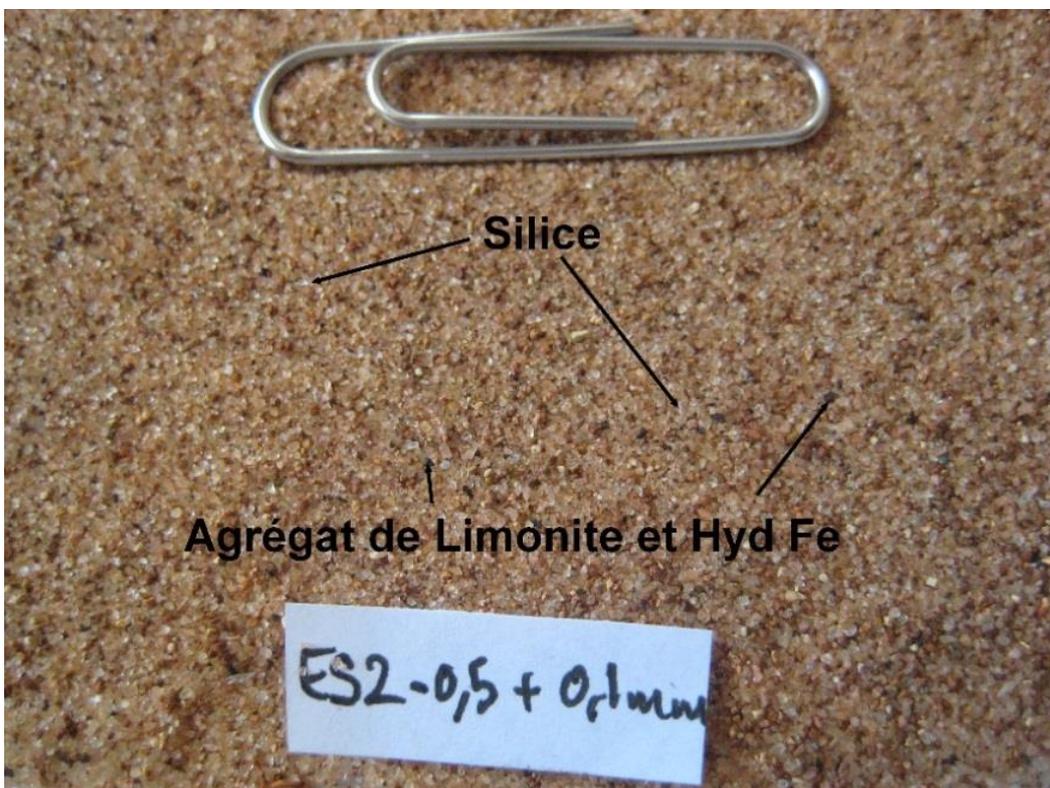


Photo 46: Les minéraux représentatifs de la fraction 0,1 mm d'ES2

VII.2.1.3 - Echantillon ES3

L'observation au microscope optique des prélèvements à partir du refus ponctuel de l'échantillon ES3 permet d'avoir le résultat dans le tableau 17 ci-après.

Tableau 17: Résultat d'observation microscopique d'ES3

Distribution granulaire	Fractions	2,5mm	-2,5+1mm	-1+0,5mm	-0,5+0,1mm
	Prise (g)	2,3	24,4	42,5	31,6
Minéraux (%) Pourcentage volumetrique	Agrégat : Limonite+Hydroxyde de Fer	-	-	-	3
	Silice libre : Quartz+Feldspath	100	100	100	97

Commentaire

- a) Par une observation à l'œil nu et même au microscope, la fraction 2,5mm est constituée généralement par des quartz et Feldspaths (silice libre). Aucune présence d'agrégat de limonite et de l'hydroxyde de fer ne se trouve sur cette fraction.



Photo 47: Les minéraux représentatifs de la fraction 2,5 mm d'ES3

- b) La fraction 1mm est aussi constituée de 100% de quartz et des feldspaths (silice libre).
- c) La fraction 0,5mm est constituée de 100% de quartz et des feldspaths (silice libre).
- d) La fraction 0,1mm est constituée de :
- 3% des agrégats de limonite, d'hydroxyde de Fer avec inclusion de silice à l'intérieure ;
 - 97% de quartz et des feldspaths (silice libre) ;



Photo 48: Fraction 0.1 mm de l'échantillon ES3

Remarque :

Les trois échantillons de sols étant très riches en éléments fins (surtout ES2). Les résultats d'examens au microscope ne donnent que des renseignements très limités sur la composition minéralogique des échantillons.

Des examens auraient dû être effectués sur la partie fine ($<80\mu\text{m}$), surtout pour ES2 pour lequel cette partie correspond à 93% de l'échantillon.

VII.2.2 – Détermination de quelques minéraux argileux par la méthode de Casagrande

On place sur l'abaque de plasticité de Casagrande de la figure 10 les points correspondant à l'échantillon (Ip et WL) et de comparer sa position avec celle des minéraux connus.

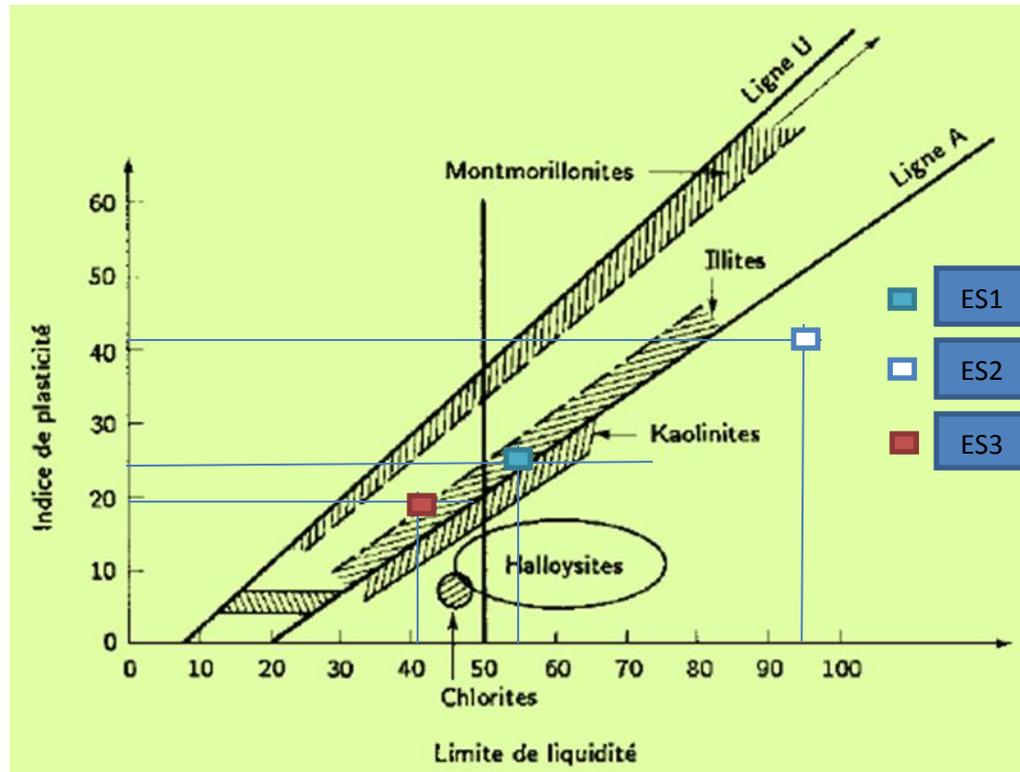


Figure 10: Position des échantillons dans l'abaque de Casagrande

D'après cet abaque :

- ES1 et ES3 contient des minéraux d'illites
- ES2 contient de la kaolinite de type Halloysites

VII.3 - Caractéristiques géotechniques

VII.3.1 - Granularité

Les analyses granulométriques ont donné les résultats dans le tableau suivant :

Tableau 18: Résultats des analyses granulométriques

	Tamis (mm)	Module	%passants cumulés ES1	%passants cumulés ES2	%passants cumulés ES3
Tamisage (ouverture tamis en mm)	6,3	39,0	100,0	100,0	100,0
	5	38,0	99,5	99,5	100,0
	2	34,0	98,9	98,7	99,7
	1	31,0	97,6	97,8	95,4
	0,63	29,0	92,0	97,1	87,4
	0,5	28,0	88,0	96,7	81,7
	0,4	27,0	74,6	96,3	76,5
	0,315	26,0	67,0	95,7	68,6
	0,2	24,0	61,1	94,2	56,4
	0,08	20,0	56,5	93,0	40,9
Sédimentométrie (Diamètre équivalent en mm)	0,05	18,0	55,0	91,0	38,0
	0,02	14,0	39,0	87,0	27,0
	0,01	11,0	29,0	78,0	17,0
	0,005	8,0	23,0	69,0	11,0
	0,002	4,0	17,0	63,0	6,0
	0,001	1,0	14,0	58,0	2,0

L'exploitation des résultats de l'analyse granulométrique permet de définir les différents seuils de la granularité dans le tableau suivant :

Tableau 19: Granularités des échantillons

Caractéristiques géotechniques	ES1	ES2	ES3
Dmax	5,0 Dmax ≤50mm	5 Dmax ≤50mm	2 Dmax ≤50mm
Passant à 2mm	98,9	98,7	99,7
Passant à 0,08 mm (%)	56,5	93	40,9
Passant à 0,002mm (%)	17,0	63	6

Ces résultats nous permettent de tracer les courbes granulométriques suivantes. Pour une bonne visualisation, les courbes seront tracées à partir du pourcentage cumulé des tamisât en fonction du module du tamis.

VII.3.1.1 - Courbe d'analyse granulométrique

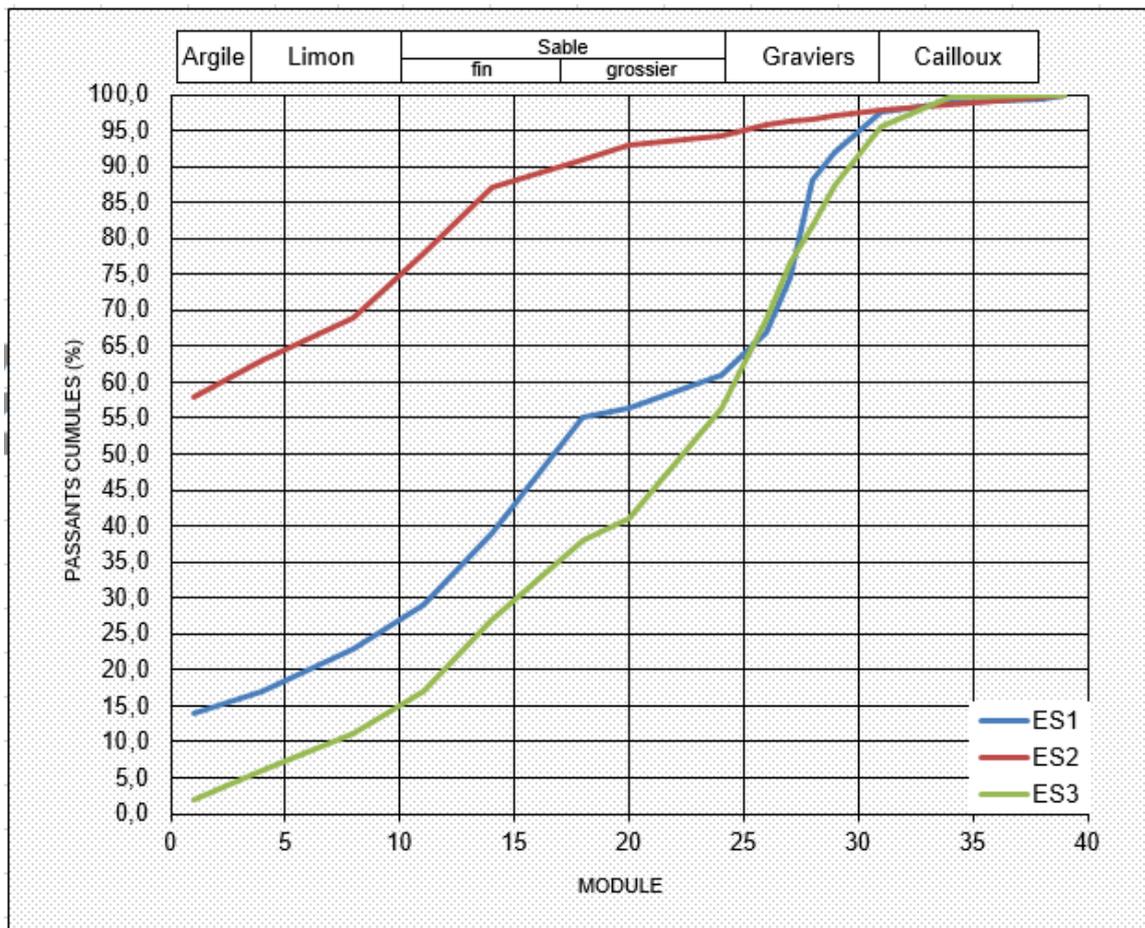


Figure 11: Courbe d'analyse granulométrique

La dimension maximale D_{max} des grains des échantillons ES1 et ES2 est de 5mm et celle d'ES3 est de 2mm. Ces valeurs nous indiquent que ces sols pourraient être malaxés intimement avec un liant pour constituer des couches de forme et d'assise de qualité.

L'échantillon ES1 est constitué de 98.9% de squelette en masse inférieure à 2mm, 56.5% de particules fines passant à 0.080mm et 17% de fraction argileuse en masse passant à 0.002mm.

L'échantillon ES2 est constitué de 98.7% de squelette en masse inférieure à 2mm, 93% de particules fines passant à 0.080mm et 63% de fraction argileuse en masse passant à 0.002mm.

L'échantillon ES3 est constitué de 99.7% de squelette en masse inférieure à 2mm, 40.9% de particules fines passant à 0.080mm et 6% de fraction argileuse en masse passant à 0.002mm.

Les tamisât à 2mm sont tous supérieures à 70%, donc à ce stade ces sols ont une tendance sableuse.

Mais vis à vis du tamisât à 80 μ m, ces échantillons sont riches en particules fines qui influenceront leurs comportement mécaniques et/ou géotechniques comme la sensibilité à l'eau, la plasticité et d'autres. Le pourcentage du tamisât à 80 μ m nous amène dans le domaine du limon et d'argile. Cette argilosité va être confirmée par d'autre paramètre comme l'indice de plasticité et la valeur au bleu.

VII.3.1.2 - Classification selon la granulométrie

À partir de ces résultats, on peut classier ces sols par la dimension des grains qui les constituent dans un ordre décroissant. Ces classifications selon la granularité sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 20: Classification granulaire

Classification	Ouverture des tamis mm	Pourcentages de refus et passant à 0,002 mm		
		ES1	ES2	ES3
Gravier	2mm < D < 20mm	1.1	1.3	0.3
Sable grossier	0,2mm < D < 2mm	37.8	4.5	43.3
Sable fin	0,02 mm < D < 0,2mm	22.1	7.2	29.4
Limon	0,002mm < D < 0,02mm	22	24	21
Argile et colloïde	D < 0,002 mm (passant)	17	63	6

D'après cette classification, la nature de chaque échantillon du sol sera proposée comme suit :

- ES1 : Limon argileux sableux
- ES2 : Argile Limoneux
- ES3 : Limon sableux

VII.3.2 - L'argilosité

L'argilosité des échantillons est évaluée par la détermination de leur valeur au bleu (VBS) et par leurs limites d'Atterberg dans les figures 12,13 et 14.

- La détermination de la limite de liquidité de l'échantillon ES1 est présentée par la figure 12 suivante.

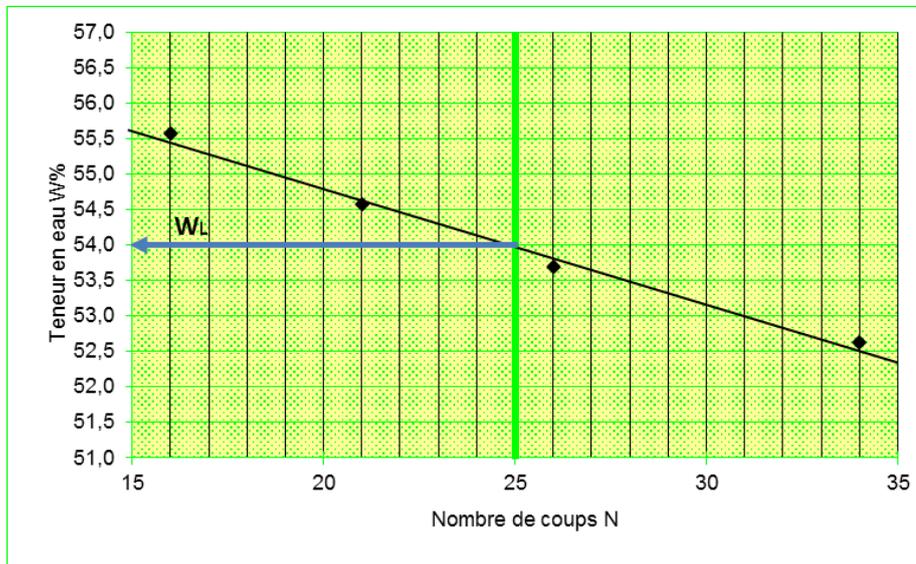


Figure 12: Détermination de la limite de liquidité pour ES1

- La détermination de la limite de liquidité de l'échantillon ES2 est présentée par la figure 13 suivante.

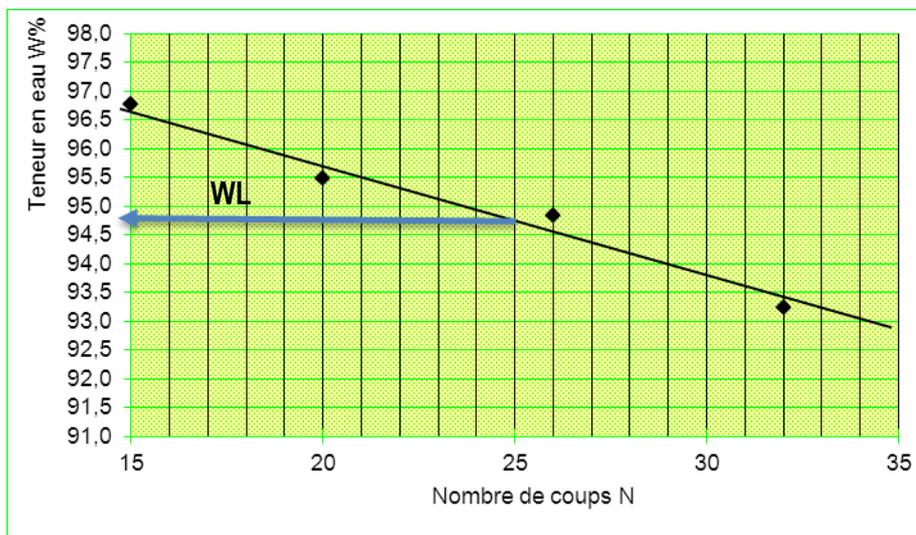


Figure 13: Détermination de la limite de liquidité pour ES2

- La détermination de la limite de liquidité est présentée par la figure 14 suivante.

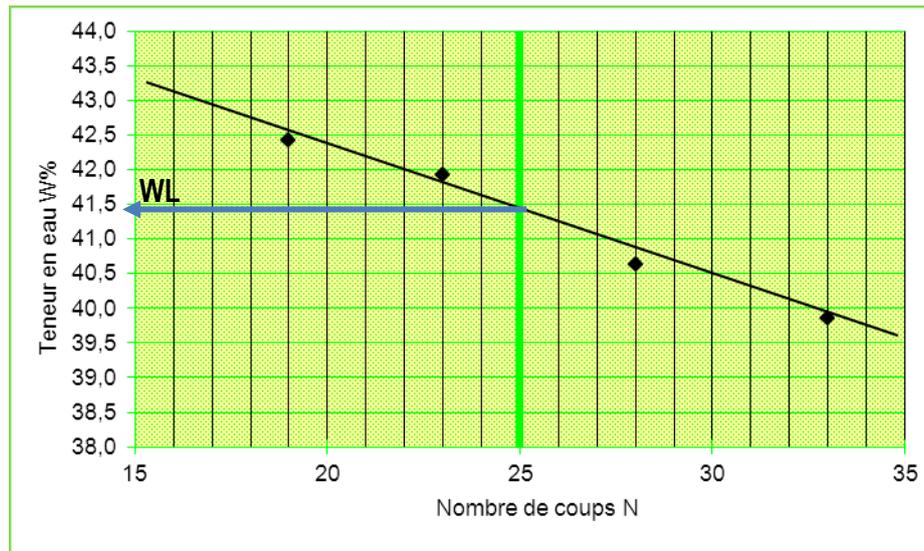


Figure 14: Détermination de la limite de liquidité pour ES3

En effet, le caractère plus ou moins plastique d'un sol est en relation étroite avec ses caractères argileux (la proportion de la partie argileuse et la nature des minéraux argileux). Le tableau 21 affiche les résultats de ces déterminations

Tableau 21: Résultats sur l'argilosité

Caractéristiques géotechniques	ES1	ES2	ES3
Valeur au bleu de méthylène	0,9	1,57	0,47
VBs g.100g-1 sol sec	0,2 < VBs < 2,5	0,2 < VBs < 2,5	0,2 < VBs < 2,5
Limite de liquidité W_L (%)	54,0	94,7	41,5
Limite de plasticité W_p (%)	30,0	53,8	22
Indice de plasticité I_p (%)	24,0 15 < I_p < 40	40,9 I_p > 40	19,5 15 < I_p < 40
Teneur en eau naturelle (%)	22,6	38,9	23,7
Indice de consistance I_c	1,3	1,4	0,9

VII.3.2.1 - Echantillon ES1

La teneur en eau correspondant à 25 coups donne la limite de liquidité W_L . Dans ce cas, cette limite est de 54%. Cette valeur confirme le caractère sableux et limoneux du sol.

Il s'agit d'un sol plastique, moyennement argileux. Ce sol ne peut se travailler que si la teneur en eau de son mortier est égale ou inférieure à la limite de plasticité de 30%. Comme la limite de plasticité et la limite

de liquidité sont supérieures à la teneur en eau naturelle et l'indice de consistance est supérieur à 1, ce sol est très consistant, c'est-à-dire à l'état solide lors de l'échantillonnage.

À l'état plastique comme à l'état solide, les éléments très fins du sol sont doués de cohésion ou capacité de résister aux efforts de cisaillement.

Sa valeur au bleu est comprise entre 0,2 à 2,5 g pour 100g du sol, cette valeur nous indique qu'il est sensible à l'eau sous dominance des limons.

VII.3.2.2 - Echantillon ES2

La valeur très élevée de W_L confirme sa très grande sensibilité à l'eau, qui est en relation avec la forte proportion de la fraction argileuse.

Il s'agit d'un sol très argileux et très plastique avec une teneur en eau naturelle élevée. Par sa limite de plasticité, la plage de la teneur en eau où l'on pourra travailler le sol est importante. La teneur en eau marquant cette limite est inférieure ou égale à 53.8%. Cette limite de plasticité et la limite de liquidité sont supérieures à la teneur en eau naturelle et l'indice de consistance est supérieur à 1. Par rapport à ces paramètres, ce sol est aussi très consistant.

Cette forte plasticité, favorise la résistance aux efforts de cisaillement.

Sa valeur au bleu est comprise entre 0,2 à 2,5 g pour 100g du sol, cette valeur nous indique qu'il est sensible à l'eau sous dominance des minéraux argileux et des limons.

Ces constatations confirment la valeur très élevées de CEC de ce sol ($CEC = 4,2 \text{ meq}/100\text{g}$) ainsi que de sa surface spécifique ($S = 32.86 \text{ m}^2/\text{g}$). Ce sol est très fin et à caractère argileux très prononcé.

VII.3.2.3 - Echantillon ES3

La valeur plus faible de W_L est due à son caractère plus sableux. Ce sol est moins sensible à l'eau que les deux autres.

Par sa limite de plasticité inférieure à la teneur en eau naturelle, il s'agit d'un sol peu plastique, faiblement argileux. Il ne peut se travailler que si la teneur en eau de son mortier est égale ou inférieure à la limite de plasticité de 22%. Ce sol dont l'indice de consistance est compris entre 0 à 1 est moins consistant et moins cohésif par rapport aux deux échantillons précédents. Par conséquent, il résiste moins aux efforts de cisaillement. Ceci traduit aussi son caractère sableux.

Sa valeur au bleu est comprise entre 0,2 à 2,5 g pour 100g du sol, cette valeur nous indique qu'il est sensible à l'eau sous dominance des particules fines, en particulier la partie limoneuse.

VII.3.3 - Gonflement libre

Quant au gonflement libre, l'échantillon ES1 augmente de 10% en volume après avoir été immergé dans l'eau pendant 40 minutes à l'état non foisonné. Les particules fines argileuses contenues dans ce sol influencent beaucoup ce paramètre.

L'échantillon ES2 et ES3 augmente de 5% en volume à l'état non foisonné.

VII.3.4 - La masse volumique des particules solides

Le tableau suivant présente les résultats de la masse volumique des particules solides de chaque échantillon.

Tableau 22: Masse volumique des particules solides

Echantillons	ρ_s (g/cm ³)
ES1	2.58
ES2	2.76
ES3	2.60

Ces valeurs renseignent sur les minéraux constitutifs de l'échantillon à base de la silice, de l'oxyde de fer et d'aluminium. L'échantillon ES1 et ES3 ont une masse volumique très proche des latérites. Quant à l'échantillon ES2, il peut être classifié comme un sol latéritique.

VII.3.5 - L'équivalent de sable

Comme l'échantillon ES3 apparaît comme sableux visuellement, un essai d'équivalent de sable a été effectué pour savoir sa propreté. Le résultat de cet essai sera affiché dans le tableau suivant.

Tableau 23: équivalent de sable d'ES3

Echantillon	Equivalent de sable ES (%)	Interprétation
ES3	24	Cet échantillon apparaît comme sableux mais vu la valeur de l'équivalent de sable, il est un sol plastique. Cette plasticité est due à l'influence des particules fines qu'ils contiennent.

VII.3.6 – Les Caractéristiques de compactage sols étudiés

L'humidification et le compactage des échantillons du sol à plusieurs teneurs en eau permettent d'obtenir les caractéristiques de compactage dans le tableau ci-après.

Tableau 24: Caractéristiques de compactage

Echantillons	Caractéristiques de compactage		Teneur en eau naturelle (%)
	ρ_d OPM (T/m ³)	W_{opm} (%)	
ES1	1,60	22,4	22.6
ES2	1,39	33,9	38.9
ES3	1,80	14,1	23.7

Ces Optimum Proctor ont été obtenus par une énergie de compactage de 2700KN.m/m³ sur un volume de 947.4cm³.

Les figures 15, 16 et 17 illustrent les résultats des essais Proctor. La courbe sera tracée à partir de la variation de la teneur en eau et de la masse volumique sèche correspondante.

VII.3.6.1 - Courbe Proctor ES1

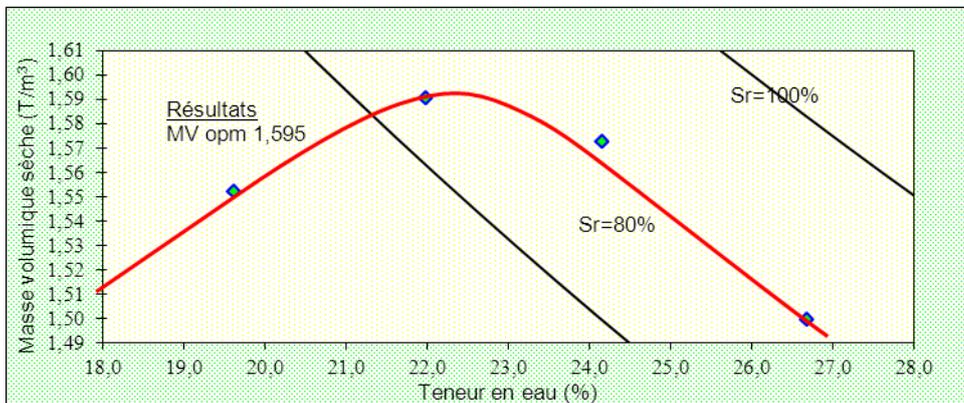


Figure 15: Courbe Proctor ES1

La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour avoir une bonne compacité c'est-à-dire le minimum de vide de l'échantillon ES1 sont respectivement 22.4% et 1.60T/m³.

Sa densité et la forme plus ou moins fermée de cette courbe reflètent sur la présence des particules fines (limons et minéraux argileux). Par un bon compactage et avec une teneur en eau adéquate ($W_{opm} = 22,4\%$), ce sol pourrait présenter une bonne stabilité et une bonne cohésion ce qui est justifié par sa densité sèche maximale de 1,6 T/m³.

VII.3.6.2 - Courbe Proctor ES2

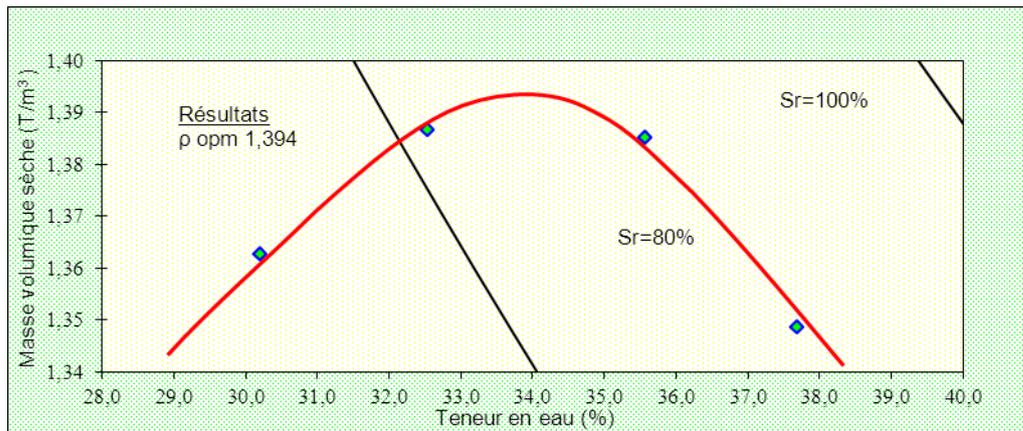


Figure 16: Courbe Proctor ES2

La valeur élevée de W_{opm} confirme le caractère argileux de ce sol. La très grande plasticité explique que ce sol est plus difficile à compacter.

Dans les meilleures conditions, la teneur en eau optimale et une bonne énergie de compactage, la masse volumique sèche maximale ne dépasserait pas de 1,4 T/m³. Ce sol est très sensible à l'eau par sa forte teneur en éléments argileux et très fins.

VII.3.6.3 - Courbe Proctor ES3

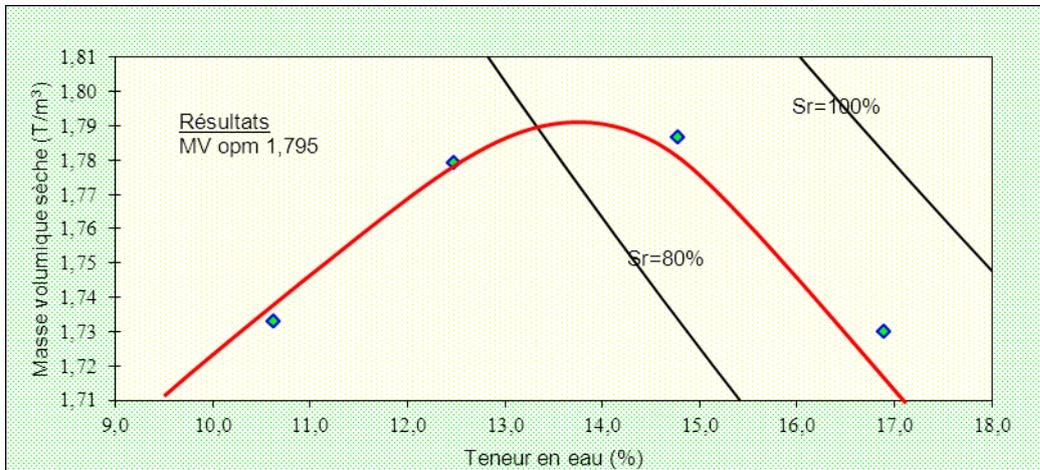


Figure 17: Courbe Proctor ES3

Avec très peu d'eau ($W_{opm} = 14,1\%$) on pourrait obtenir une grande compacité dont la densité sèche maximale est 1,8 T/m³. L'allure de la courbe et sa densité renseignent sur le caractère plus sableux de ce sol.

Toutefois, même s'il est moins sensible à l'eau, le manque de minéraux argileux entraîne une faible stabilité. Ce sol peut être amélioré avec un bon traitement mécanique et avec un apport en sol argileux.

VII.3.7 – La portance des sols non traités

Le tableau 25 affiche les résultats des essais CBR des trois échantillons ES1, ES2 et ES3 non traités.

Tableau 25: Portance des sols non traités

Echantillons	Enfoncement (mm)	Poinçonnement (kN)	CBR après 4j d'imbibition dans l'eau	Gonflement absolu (%)	EV2 équivalent (Mpa)	Classe de portance	
						PF	S
ES1	0	0	10	1,77	50	PF1	S2
	1,25	0,5					
	2	0,8					
	2,5	1					
	3	1,2					
	4	1,6					
	5	1,9					
	6	2,1					
ES2	0	0	15	1,62	75	PF2	S3
	1,25	1,3					
	2	1,8					
	2,5	2					
	3	2,1					
	4	2,3					
	5	2,5					
	6	2,7					
ES3	0	0	21	0,70	105	PF3	S3
	1,25	1,3					
	2	2					
	2,5	2,4					
	3	2,8					
	4	3,3					
	5	3,8					
	6	4,2					
	7,5	4,7					

Commentaires :

Ce tableau montre l'enfoncement d'un piston CBR par rapport aux efforts appliqués à l'éprouvette. Il montre aussi le pourcentage du gonflement des échantillons après 4 jours d'imbibition dans l'eau et quelques exploitations de ces résultats.

Les résultats des essais CBR sont illustrés par la figure ci-après

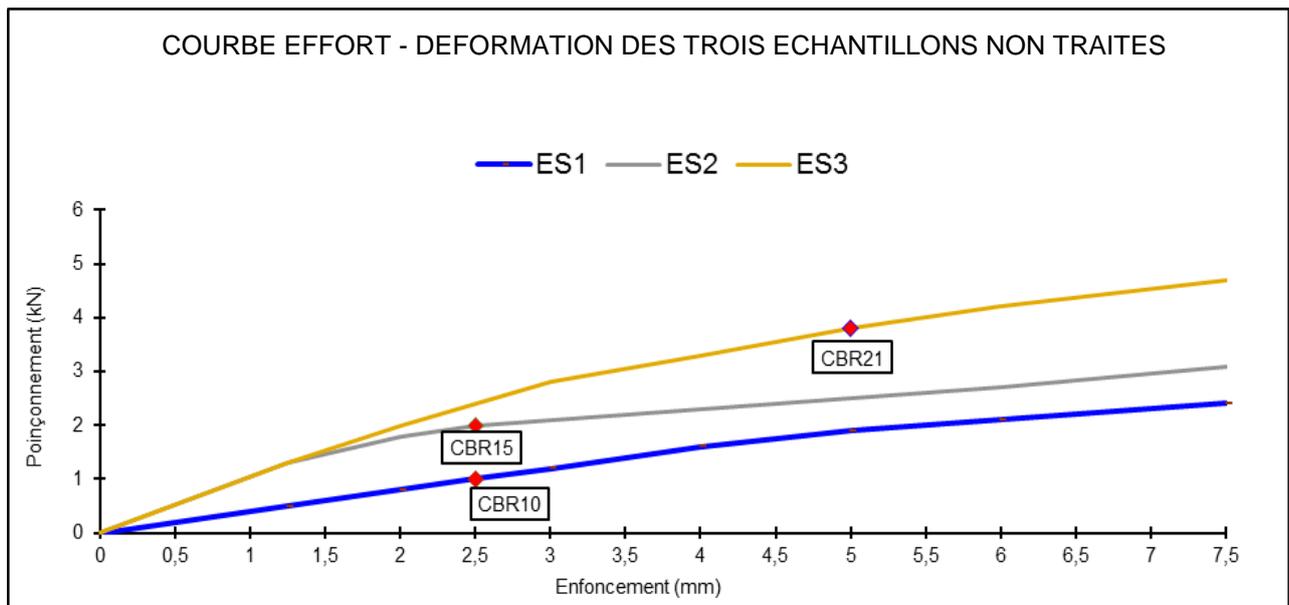


Figure 18 : Courbes efforts-déformations des trois échantillons non traités

Les interprétations de ces résultats seront effectuées dans le paragraphe suivant.

VII.3.7.1 - Interprétations de résultats des essais CBR

Les résultats des essais CBR sur les échantillons ES1, ES2 et ES3 renseignent que le sol support des tronçons de routes étudiés ne pourraient être utilisés qu'en couche de forme. Leur indice CBR est compris entre 10 à 30.

- Le cas de l'échantillon ES1, son indice CBR se trouve sur une valeur limite inférieure par rapport à celle requise pour la plate-forme. La classe de portance de ce sol est PF1.
- Le cas de l'échantillon ES2, son indice CBR se trouve sur une valeur moyenne par rapport à celle requise pour la plate-forme. Sa classe de portance est de PF2.
- L'échantillon ES3 a une portance plus élevée par rapport aux autres. Sa classe de portance est PF3

L'aptitude aux différentes structures de la chaussée nécessite des améliorations et traitements de ce sol support.

VII.4 - Classification GTR

La figure 19 montre la projection des trois sols dans le tableau synoptique de classification GTR.

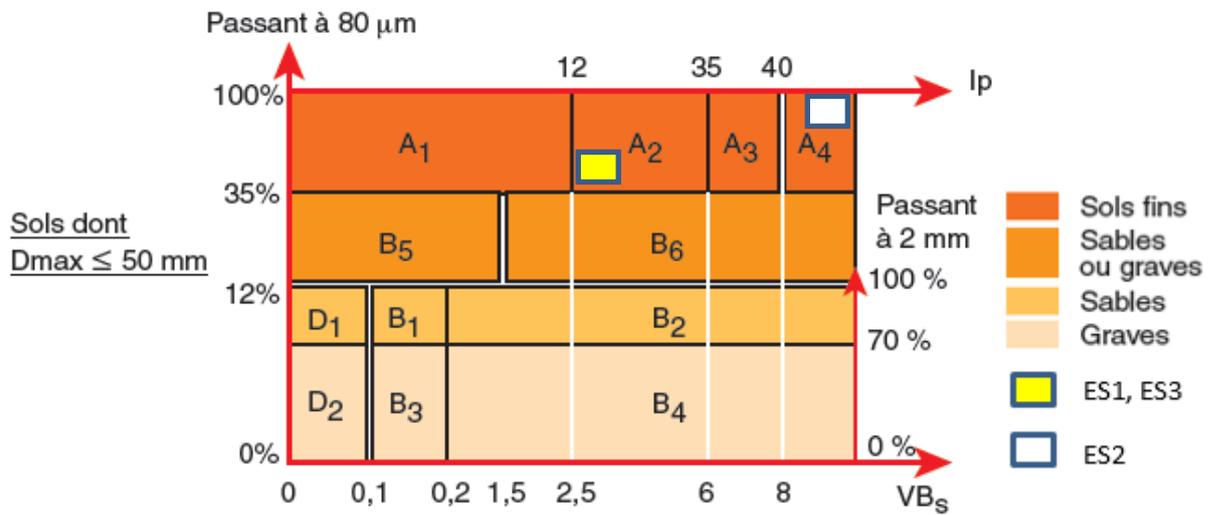


Figure 19: Classification des sols étudiés

D'après cette figure, on peut résumer les résultats de la classification dans le tableau 26 suivant

Tableau 26: Classification GTR des sols étudiés

Niveau de classification	ES1	ES2	ES3
1^{er} niveau de classification	Tamisât à 0,080mm > 35% Dmax < 50mm A	Tamisât à 0,080mm > 35% Dmax < 50mm A	Tamisât à 0,080mm > 35% Dmax < 50mm A
2^{ème} niveau de classification	12 < Ip < 25 A ₂	Ip > 40 A ₄	12 < Ip < 25 A ₂
Sous classification à base de l'état hydrique	0,9*wopm < wn < 1,1wopm Classe : A_{2m}	1,1*wopm < wn < 1,3wopm Classe : A₄	0,9*wopm < wn < 1,1wopm Classe : A_{2h}

Par rapport aux résultats d'analyse granulométrique, de leur indice de plasticité, et de leur état hydrique :

- ES1 peut être classé comme sol fin de classe A_{2m} ;
- ES2 est classé comme sol très fin de classe A₄ ;
- ES3 est aussi classé comme sol fin de classe A_{2h}.

Les lettres m et h indique l'Etat hydriques des échantillons au moment de l'essai. Il peut être modifiable selon les conditions climatiques du site.

VII.5 - Récapitulation des résultats

Les résultats des essais d'identifications des 03 échantillons des sols prélevés sur la zone d'étude choisie permettent donc d'interpréter et de comprendre leurs propriétés chimiques, minéralogiques et géotechniques. Ils peuvent aider à prévoir le comportement des terrains du point de vue de la stabilité, de la portance, des états hydriques et plus particulièrement les anomalies qui peuvent se présenter.

La synthèse de ces résultats est présentée dans les tableaux suivant.

Tableau 27: Synthèse de résultats des caractéristiques chimiques des sols étudiés

Echantillons	%Somme MOH	%Fe ₂ O ₃	%TiO ₂	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%CaO	%MgO	%humidité	%MO	%PF	pH	CEC (meq/100g)	S (m ² /g)
1(ES1)	29,39	9,23	1,56	18,60	55,12	0,84	2,60	1,06	7,5	10,32	6.53	2,41	18,84
2(ES2)	48,72	6,19	1,96	40,57	34,91	0,53	0,16	0,99	5,2	13,07	6.2	4,20	32,86
3(ES3)	16,13	9,49	0,28	6,36	68,46	1,11	3,18	0,75	4,8	7,21	5.87	1,26	9,84

Tableau 28: Synthèse de résultats des caractéristiques minéralogiques des sols étudiés

Distribution granulaire	Echantillons	ES1				ES2				ES3			
	Fractions	2,5mm	+1mm	+0,5mm	+0,1mm	2,5mm	+1mm	+0,5mm	+0,1mm	2,5mm	+1mm	+0,5mm	+0,1mm
	Prise (g)	42.90	19.50	30.00	31.10	23,8	16,4	37,5	40,0	2,3	24,4	42,5	31,6
Minéraux (%)	Agrégat : Limonite +	100*	20*	7	25	100*	60	20	15	-	-	-	3
	Silice libre :	-	5	83	75	-	40	80	85	100	100	100	97
	Silice cimenté par	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Minéraux argileux	Présence d'illite				Présence d'Halloysite				Présence d'illite			

Tableau 29: Synthèse de résultats des caractéristiques géotechniques des sols étudiés

Caractéristiques géotechniques	ES1	ES2	ES3
Dmax	5,0 Dmax ≤50mm	5 Dmax ≤50mm	2 Dmax ≤50mm
Passant à 2mm sur 0/Dmax (%)	98,9	98,7	99,7
Passant à 0,08 mm (%) sur 0/Dmax	56,5	93	40,9
Passant à 0,002mm (%) sur 0/Dmax	17,0	63	6
Valeur au bleu de méthylène VBs g.100g-1 sol sec	0,9 0,2 < VBs < 2,5	1,57 0,2 < VBs < 2,5	0,47 0,2 < VBs < 2,5
Limite de liquidité WL	54,0	94,7	41,5
Limite de plasticité Wp	30,0	53,8	22
Indice de plasticité Ip	24,0 15 < Ip < 40	40,9 Ip > 40	19,5 15 < Ip < 40
Indice de consistance Ic	1,3	1,4	0,9
Masse volumique des particules solides ρs (g/cm³)	2,6	2,76	2,6
Teneur en eau naturelle Wn (%)	22,6	38,9	23,7
Teneur en eau optimum Wopm (%)	22,4	33,9	14,1
Masse volumique sèche optimale ρd OPM (T/m³)	1,6 1,6 < ρd OPM < 1,8	1,39 ρd OPM < 1,6	1,8 1,6 < ρd OPM < 1,8
Indice de portance après immersion 4jours ICBR	10,0	15	21
Gonflement relatif Gr (%)	1,8	1,62	0,7
Gonflement libre GL (%)	10,0	5	5
Teneur en matière organique MO (%)	7,5	5,2	4,8
Equivalent de sable Es (%)			24
Classe GTR	A ₂	A ₄	A ₂
Appellation géotechnique	Limon Argileux Sableux	Argile Limoneux	Limon Sableux

PARTIE III- ESSAI D'AMELIORATION DES SOLS ETUDIES

INTRODUCTION

Selon l'expérience du laboratoire, les résultats d'identifications de sols étudiés (chimique, minéralogique et géotechnique), les améliorations par le traitement chimique (à la chaux et au ciment CEMI 42.5), par le traitement mécanique au moyen de la lithostabilisation (ajout des sables et des gravillons) ont été adoptées.

Certaines caractéristiques géotechniques ainsi que les performances mécaniques sont à vérifier après la stabilisation ou l'amélioration d'un matériau traité. Dans ce présent travail, les propriétés mise en évidence pour les sols traités chimiquement sont l'argilosité au moyen de l'essai au bleu de méthylène et des limites d'Atterberg. Pour ceux qui sont traités par la méthode de litho-stabilisation, les propriétés à mettre en évidence sont : la granularité, l'argilosité, la densité sèche maximale et la portance ou la résistance au poinçonnement.

CHAPITRE VIII- CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DE TRAITEMENTS

VIII.1 - Caractéristiques des produits de traitements chimiques

VIII.1.1 – Chaux

Les tableaux 30, 31 suivants montrent les résultats de caractérisations de la chaux utilisée pour le traitement chimique.

Tableau 30: Composition chimique de la chaux éteinte

Eléments à doser	Perte au feu à 975°C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO totale	MgO	SO ₃	CO ₂
Teneur en %	24,20	2,10	4,84	0,16	50,00	6,95	0,47	8,77

Par rapport à la norme, la teneur en MgO est un peu élevée. Il s'agit d'une chaux magnésienne.

Tableau 31: Composition chimique de la chaux vive

Eléments à doser	Perte au feu à 975°C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO totale	MgO	SO ₃	CO ₂
Teneur en %	24,60	2,40	5,04	0,16	55,70	1,15	0,65	12,13

Il s'agit d'une chaux calcique dont la teneur en oxyde de calcium est plus faible que celle de la chaux éteinte.

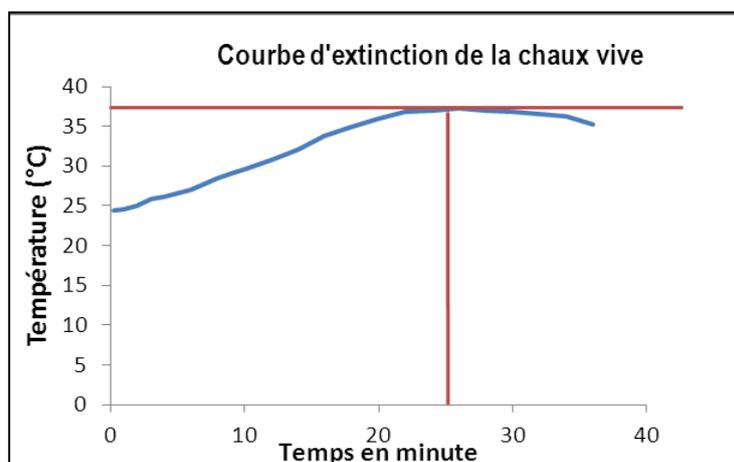


Figure 20: Courbe d'extinction de la chaux vive

Réactivité de la chaux : d'après cette courbe, l'augmentation maximale de la température de la chaux vive est de 37,2°C à 26 minutes. Ce type de chaux est à faible réactivité.

VIII.1.2 – Ciment CEMI 42,5

Les tableaux suivants montrent les résultats de caractérisations du ciment utilisé pour le traitement chimique.

VIII.1.2.1 - Caractéristiques chimiques

Tableau 32: Composition chimiques du ciment

Éléments à doser	Perte au feu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO totale	MgO	SO ₃	RI
Teneur en %	1,90	19,85	5,54	4,45	61,42	3,14	2,98	2,34

Source : Holcim

VIII.1.2.2 -Caractéristiques physiques

Tableau 33: caractéristiques physiques du ciment

Usine de production	Résistances mécaniques mortier (MPa)			Finesse	Début de prise (mn)	Stabilité (mm)
	2j	7j	28j	Blaine (cm ² /g)		
Usine Ibity Antsirabe	15,56	30,13	42,90	3415	152	5

Source : Holcim

La classe vraie du ciment est $F_{CE} = 42,9$ Mpa ce qui est très faible pour un ciment de classe 42.5 (à la limite inférieure de la définition de la classe).

VIII.2 - Caractéristiques des matériaux pour lithostabilisation

Les matériaux utilisés pour ce type de traitement sont :

- Les gravillons G1 5/10 et G2 10/20 ;
- Le sable dunaire S 0/5.

Les caractéristiques nécessaires pour ce type d'amélioration sont :

- La granularité
- Le coefficient d'absorption
- La masse volumique réelle

VIII.2.1 – Granularité des granulats pour la lithostabilisation

Les résultats d'analyses granulométriques des matériaux sont affichés dans le tableau suivant

Tableau 34: Résultats d'analyses granulométriques des matériaux pour la lithostabilisation

TAMIS (mm)	Sable 0/5	Gravillon 5/10	Gravillon 10/20
25,0	100,0	100,0	100,0
20,0	100,0	100,0	40,0
16,0	100,0	100,0	15,0
14,0	100,0	100,0	7,0
12,5	100,0	100,0	4,0
10,0	100,0	95,0	1,0
8,0	100,0	66,0	0,0
6,3	99,6	35,0	0,0
5,0	98,8	13,0	0,0
4,0	92,0	5,0	0,0
3,2	90,0	3,0	0,0
2,5	87,0	3,0	0,0
2,0	85,1	2,5	0,0
1,3	60,0	2,0	0,0
1,0	44,3	2,0	0,0
0,6	20,3	2,0	0,0
0,5	13,6	2,2	0,0
0,4	10,0	2,2	0,0
0,3	7,9	2,0	0,0
0,3	6,0	1,8	0,0
0,2	5,0	1,4	0,0
0,2	4,5	1,0	0,0
0,1	4,0	1,0	0,0
0,1	2,0	1,0	0,0

Ces résultats permettent de tracer les courbes granulométriques dans la figure 21 ci-après.

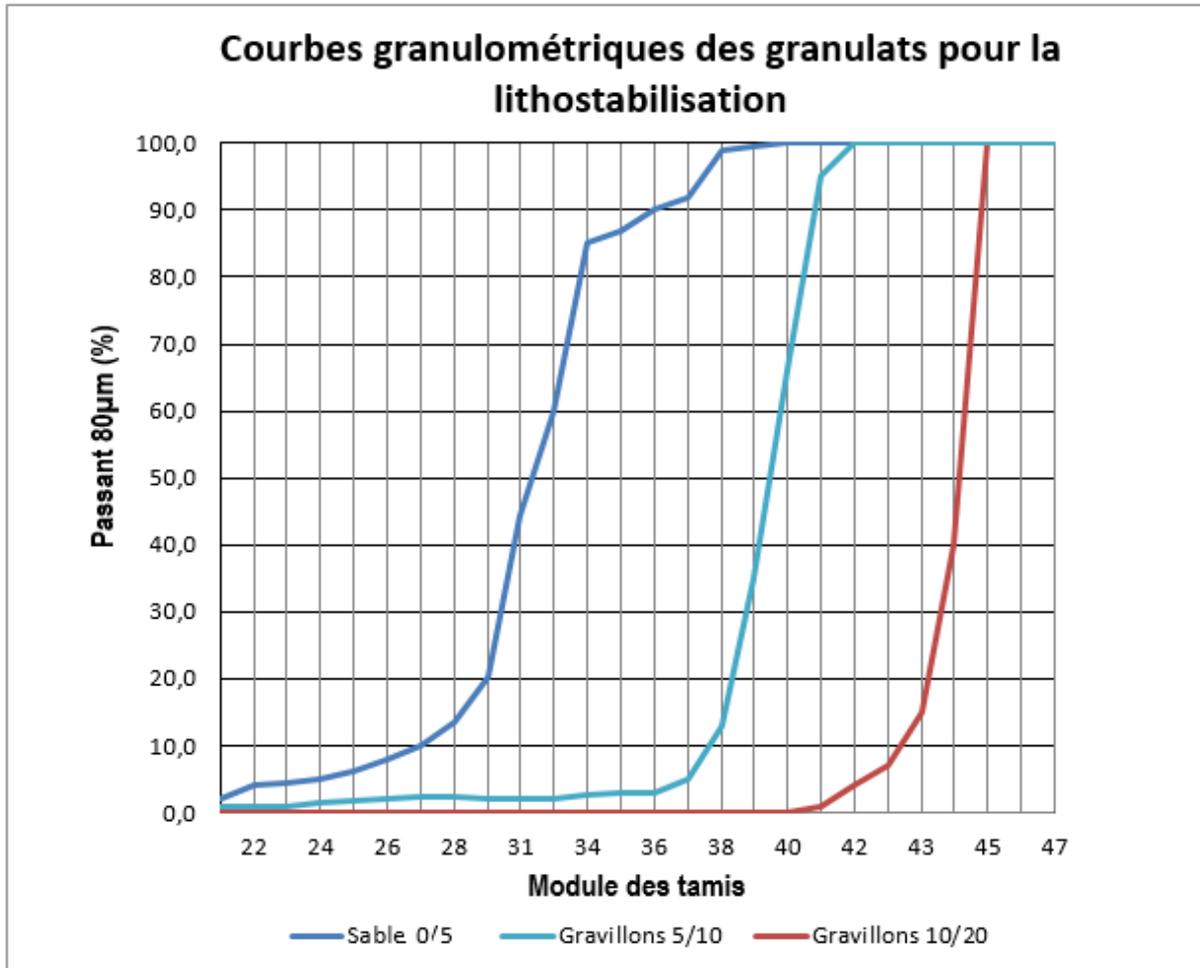


Figure 21: Courbes granulométriques des matériaux pour la lithostabilisation

Le tableau suivant permet de juger la qualité de ces courbes granulométriques.

Tableau 35: Paramètres caractérisant les courbes granulométriques

Paramètres	Sable 0/5	Gravillon 5/10	Gravillon 10/20
d ₁₀	0.40	4.50	15.00
d ₃₀	0.82	5.90	18.00
d ₆₀	1.25	7.80	22.50
C _u	3.13	1.73	1.50
C _c	1.33	0.99	0.96

- Le sable dunaire a une granulométrie étalée avec $C_u > 2$, les grains sont bien variés.
- Les gravillons 5/10 et 10/20 ont une granulométrie uniforme.
- Le coefficient de courbure C_c de ces granulats est compris entre 1 à 3. Donc, les dimensions de grains sont bien représentées et les courbes sont bien graduées.

VIII.2.2 – Masse volumique réelle et coefficient d'absorption

Les résultats des essais sur la masse volumique et le coefficient d'absorption sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 36: Masse volumique et coefficient d'absorption des granulats

Paramètres	Sable 0/5	Gravillon 5/10	Gravillon 10/20
MVR	2,66 T/m ³	2,68T/m ³	2,78 T/m ³
Abs	-	1%	2,38%

Ces granulats sont de natures différentes :

- Le gravillon 5/10 a une densité moins élevée que ce de 10/20. Il absorbe 1% d'eau lors du mélange sol-granulat, il est moins poreux. Il s'agit d'une roche métamorphique (granite migmatitique).
- Le gravillon 10/20 a une densité plus élevée. Il s'agit d'une roche volcanique poreuse et vacuolaire. Il absorbe 2,38% d'eau lors du mélange sol-granulat
- Le sable dunaire 0/5 a une densité plus faible

Ces résultats sont donc très utiles pour le dosage en eau du mélange sol-granulat.

CHAPITRE IX- ESSAIS SUR LE SITE 1 - ECHANTILLON ES1

IX.1 - Traitement chimique

Par rapport aux résultats d'analyses chimiques, l'échantillon ES1 demande des apports en oxyde fer et en oxyde de calcium pour diminuer l'indice de plasticité et augmenter la portance. Dans ce cas, ce sol de classe A_{2m} peut être stabilisé avec du ciment et/ou de la chaux vive ou éteinte. Il a été traité avec 4% à 5% du ciment, 6% de la chaux éteinte seule et 3 à 4% pour le traitement mixte (ciment et chaux).

IX.1.1 - Identification géotechnique des matériaux traités

Les résultats sur les caractéristiques géotechniques de ce sol traité sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 37: Résultats d'identifications géotechnique des matériaux traités pour ES1

CEM %	CHAUX %	Limites			Proctor		CBR _{im}		VBS	MO	pH	GTR
		WL	WP	IP	ρ_d OPM	Wopm	4j	Ga				
42,5	Eteinte	(%)	(%)	(%)	T/m ³	(%)	(%)	(%)	g/100g	(%)		
0	0	54	30	24	1,6	22,4	10	1,8	0,9	7,5	6.53	A2
4	0	38,9	29,1	9,8	1,60	21,2	49	0.09	0,6		9,80	A1
5	0	35,4	28,6	6,8	1,6	21,5	60	0,07	0,5		10.25	A1
0	6	37,3	29,2	8,1	1,56	20,6	45	0,03	0,3		11.30	A1
3	3	38,4	29,3	9,1	1,57	21,6	53	0,03	0,6		10.58	A1
4	4	36,3	30	6,3	1,58	21,2	56	0.02	0,5		10.84	A1

IX.1.2 - Aptitude aux traitements

Tableau 38: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements pour ES1

	CEM %	CH	APTITUDE		MODULE			
			Gmt	Rtb	Rit	Eit	ν	Rt
	42,5	Eteint	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)		(Mpa)
M1	4	0	0,8	0,02	0,07	452	0,10	0,05
M2	5	0	0,4	0,03	0,09	503	0,11	0,07
M3	0	6	2,4	0,04	0,09	560	0,1	0,07
M4	3	3	0,9	0,02	0,06	595	0,13	0,04
M5	4	4	0,6	0,02	0,08	668	0,14	0,06

IX.1.2.1 - Interprétation des résultats

a. Traitement au ciment

D'après ces résultats, la teneur en ciment de 4 à 5% :

- Modifie l'argilosité d'ES1 avec un indice de plasticité de 24% à 9,8% pour 4% du CEMI 42,5 et 6,8% pour 5% du ciment, soient des diminutions respectives de 14,2% et 17,2%.
- N'affecte pas du tout sur la densité sèche maximale et sur la teneur en eau optimale.
- Augmente la portance avec un indice CBR de 10 à 60 et diminue le gonflement de l'ordre de 1,7%.

Ce sol traité, pourrait être utilisé comme couche de forme et comme couche de fondation non glissante.

Sa résistance à la compression diamétrale R_{tb} à 7 jours dans l'eau à 40°C et à 28 jours dans l'air sont très faibles ; son gonflement volumique G_v est acceptable et conforme.

Donc on a : $R_{tb} \leq 0,1 \text{ Mpa}$ et $G_v \leq 5\%$

Dans ce cas, le sol traité ne résiste pas aux efforts de traction mais son module d'élasticité E_{it} peut atteindre une valeur de 452 à 503 Mpa.

b. Traitement à la chaux

D'après ces résultats, la teneur en chaux éteinte de 6% :

- Diminue fortement l'indice de plasticité de 24% à 8,1%, soit une diminution de 15,9%
- N'affecte pas du tout sur la densité sèche maximale et sur la teneur en eau optimale.
- Améliore, la portance avec un indice CBR de 10 à 45%, le gonflement de 1,8 à 0,03%.

Ce sol traité, pourrait aussi être utilisé comme couche de forme et comme couche de fondation non glissante.

Sa résistance à la traction indirecte est très faible ; Sa résistance à la compression diamétrale à 7jours dans l'eau à 40°C et à 28 jours dans l'air sont aussi très faibles. Avec la teneur en chaux de 6%, le module d'élasticité peut atteindre une valeur de 560Mpa.

Vu les caractéristiques géotechniques et mécaniques de ce sol traité, une autre amélioration devrait être apportée pour avoir les performances exigées.

c. Traitement mixte Chaux-ciment

Ce type de traitement :

Diminue aussi fortement l'IP ; à 4% du ciment et de la chaux, cette diminution est très significative.

Augmente le module d'élasticité par rapport au ciment ou à la chaux seule.

Son indice CBR permet de classer que ce sol traité pourrait supporter la couche de forme et la couche de fondation. Cet indice est nettement amélioré par rapport au traitement à 4% de ciment et/ou de chaux.

Par rapport à la valeur du pH, la teneur en chaux éteinte de 6% ne déclenche pas encore la réaction pouzzolanique escomptée (réaction lente et progressive).

Sa résistance à la compression diamétrale R_{tb} à 7jours dans l'eau à 40°C et à 28 jours à l'air sont très faibles ; son gonflement volumique G_v est aussi acceptable et conforme.

Donc on a : $R_{tb} \leq 0,1\text{Mpa}$ et $G_v \leq 5\%$

Le module d'élasticité E_{it} s'est amélioré et peut atteindre une valeur de 595 à 668Mpa.

Par rapport à ces caractéristiques mécaniques, ce type de traitement n'améliore pas toujours la résistance à la traction.

Ce traitement modifie la classification GTR de ce sol en A1 avec un comportement moyennement plastique. Par rapport au ciment seul, la chaux dosée à 6% est mieux adaptée et plus économique pour ES1. Les traitements mixtes M4 et M5 ont un module et un CBR beaucoup plus élevés mais leurs résistances à la traction indirecte restent toujours très faibles.

Les courbes suivantes permettent de visualiser facilement les résultats de traitements chimiques sur l'échantillon ES1.

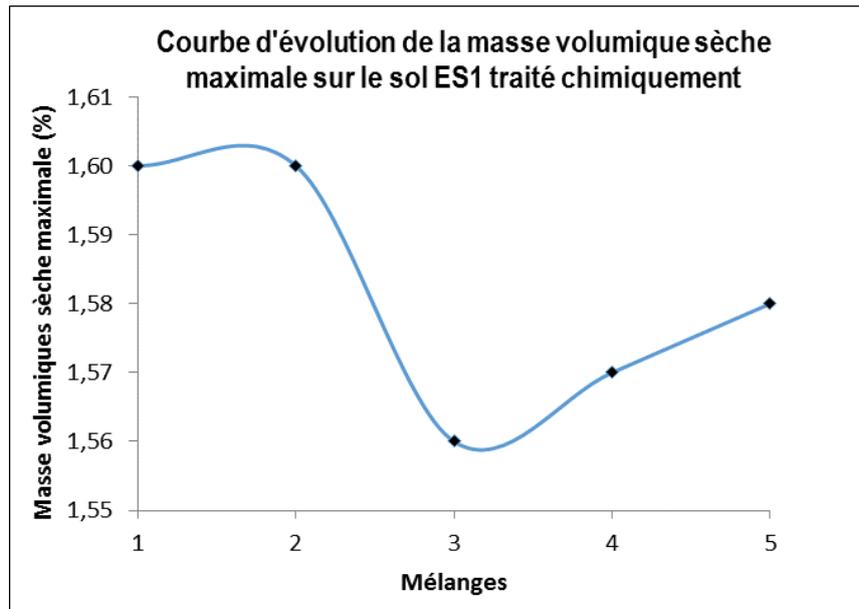


Figure 22: Courbe d'évolution de la masse volumique sèche maximale pour ES1 traité

Cette courbe représente la variation de la masse volumique sèche maximale en fonction des mélanges M1, M2, M3, M4 et M5. La teneur en chaux 6% du mélange M3 et les traitements mixtes M4, M5 diminuent légèrement cette masse volumique.

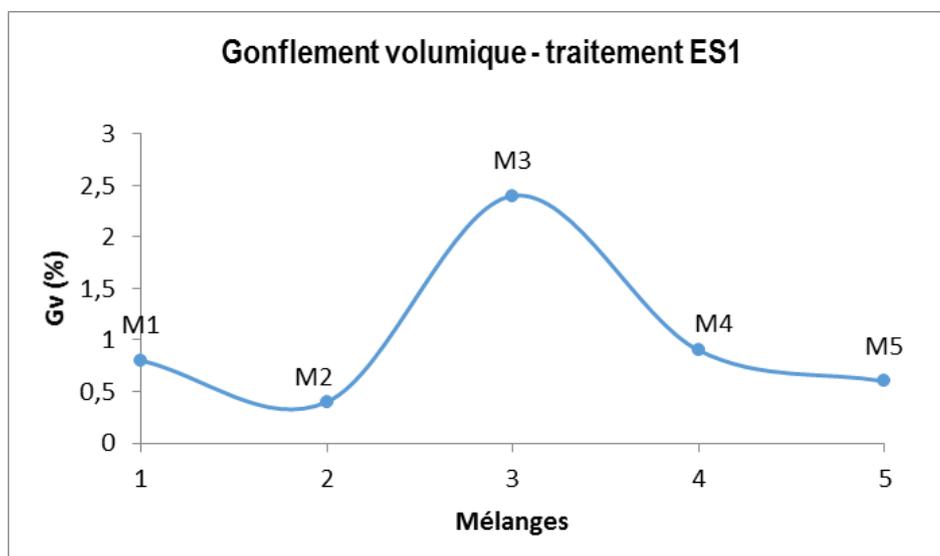


Figure 23: Gonflement volumique de l'ES1 traité

Cette courbe représente les gonflements volumétriques en fonction des mélanges M1, M2, M3, M4 et M5. Une teneur en chaux 6% (mélange M3) correspond au maximum de gonflement, tandis que ce phénomène est fortement réduit avec 5% de ciment (mélange M2).

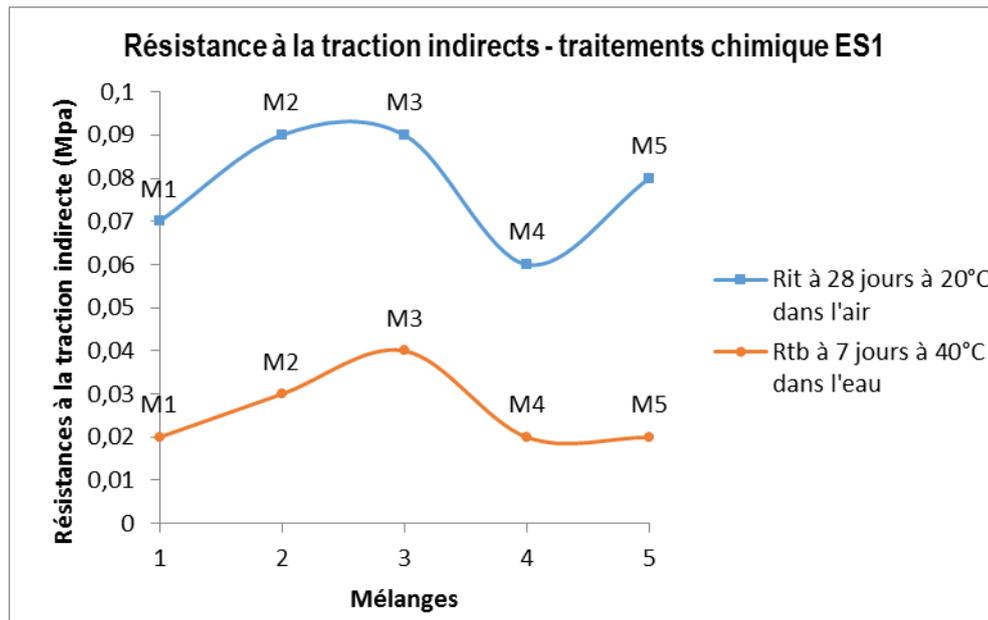


Figure 24: Résistance à la traction indirecte - ES1 traité

Cette courbe représente les résistances à la traction indirecte de l'échantillon ES1 en fonction des mélanges cités précédemment. La courbe en bleue marque la variation des résultats de résistances à la traction indirecte à 28 jours d'âge à la température de 20°C à l'air et celle en rouge à 7 jours dans l'eau de 40°C. Le traitement simple M2 et M3 résiste mieux à l'eau que le traitement mixte.

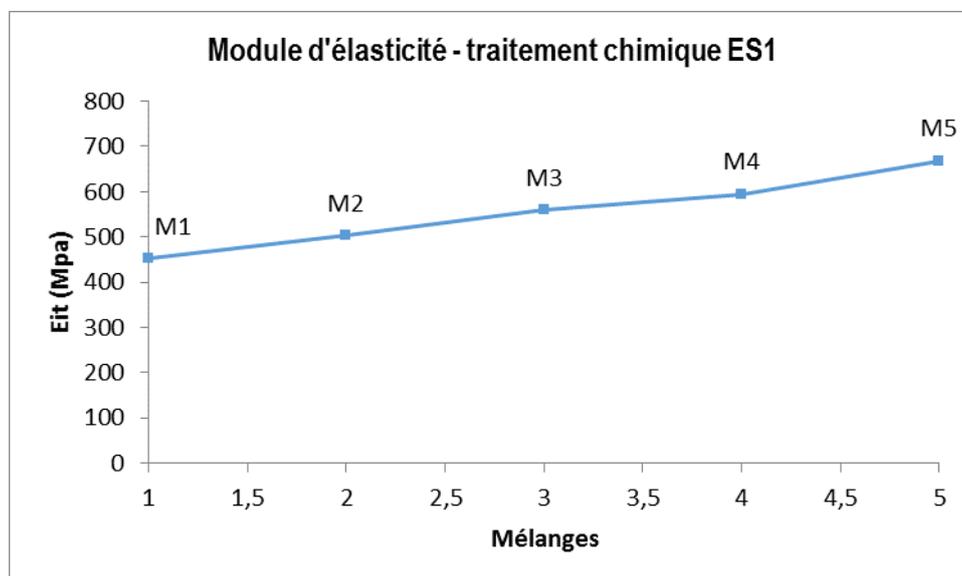


Figure 25: Module d'élasticité – traitement chimique ES1

Les traitements mixtes pour les mélanges M4 et M5 permettent d'obtenir des modules d'élasticités les plus élevées. Dans le cas des traitements simples, M3 prend la valeur maximale avec 6% de chaux.

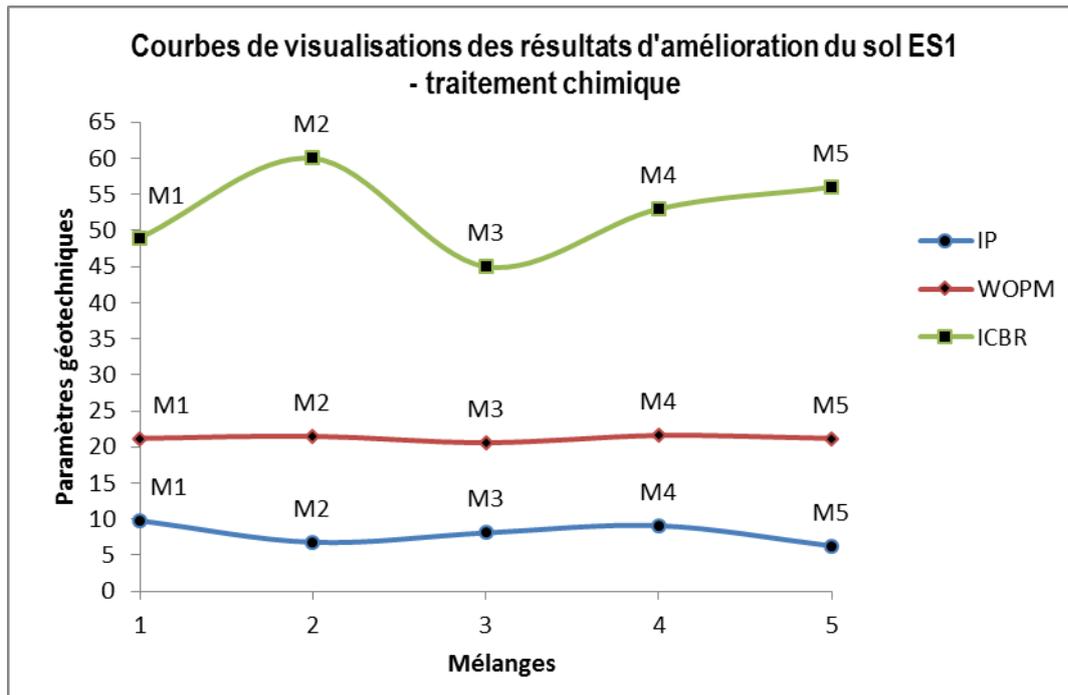


Figure 26: Courbe de visualisation des résultats d'amélioration du sol ES1

Cette courbe représente quelques paramètres géotechniques en fonction des mélanges M1, M2, M3, M4 et M5. Ces traitements améliorent la capacité portante, l'argilosité et diminuent la teneur en eau optimum pour supporter les différentes couches de la chaussée (seulement pour couche de forme et fondation). Donc, le traitement à la chaux à 6% est beaucoup plus adapté et ensuite le traitement mixte M5 avec des précautions à prendre au niveau de la résistance à la traction indirecte.

IX.2 - Traitement mécanique : Lithostabilisation

Des mélanges ont été réalisés avec différents pourcentages de sable et de gravillon pour être apte en une route en terre. Les mélanges obtenus devraient donc aptes pour une couche de revêtement, couche de base et une couche de fondation d'une route en terre.

IX.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges

Les tableaux 39 et 40 suivants affichent les résultats d'identifications géotechniques des mélanges granulat-sol.

Tableau 39: Résultats d'analyses granulométriques après lithostabilisation pour ES1

	Sol %	Lithostabilisation		W _{Nat} %	D _m	31	20	10	5	2	1	0.2	0.08
		Sable Dune	Gravillon 10/20			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
ES1	à blanc	0	0	22.6	5	100	100	100	99.5	98.9	97.6	61.1	56.5
L1	65	35	0		6,3	100	100	100	99,3	94,1	78,9	41,5	37,4
L2	60	30	10		25	100	84.1	83.4	79.6	67.7	44.9	37.6	31.9
L3	25	35	40		20	100	76,0	60,4	59,5	54,5	39,9	17,0	14,8

Tableau 40: Plasticité, Proctor, CBR après lithostabilisation pour ES1

Ech	Lithostabilisation		w% Nat	Limites			Proctor		CBR _{im}	
	Sable Dune	Gravillon 10/20		WL	WP	IP	ρ^d OPM	W _{opm}	4j	Ga
				(%)	(%)	(%)	t/m3	(%)	(%)	(%)
ES1	0	0	22,6	54	30	24	1,6	22,4	10	1,8
L1	35	0		37,2	27,1	10,1	1,5	18,9	19	1,6
L2	30	10		42,9	25	17,9	1,92	12,1	21	1,2
L3	35	40		31,5	22	9,5	1,97	11 ,2	85	0,7

IX.2.2 - Interprétations des résultats

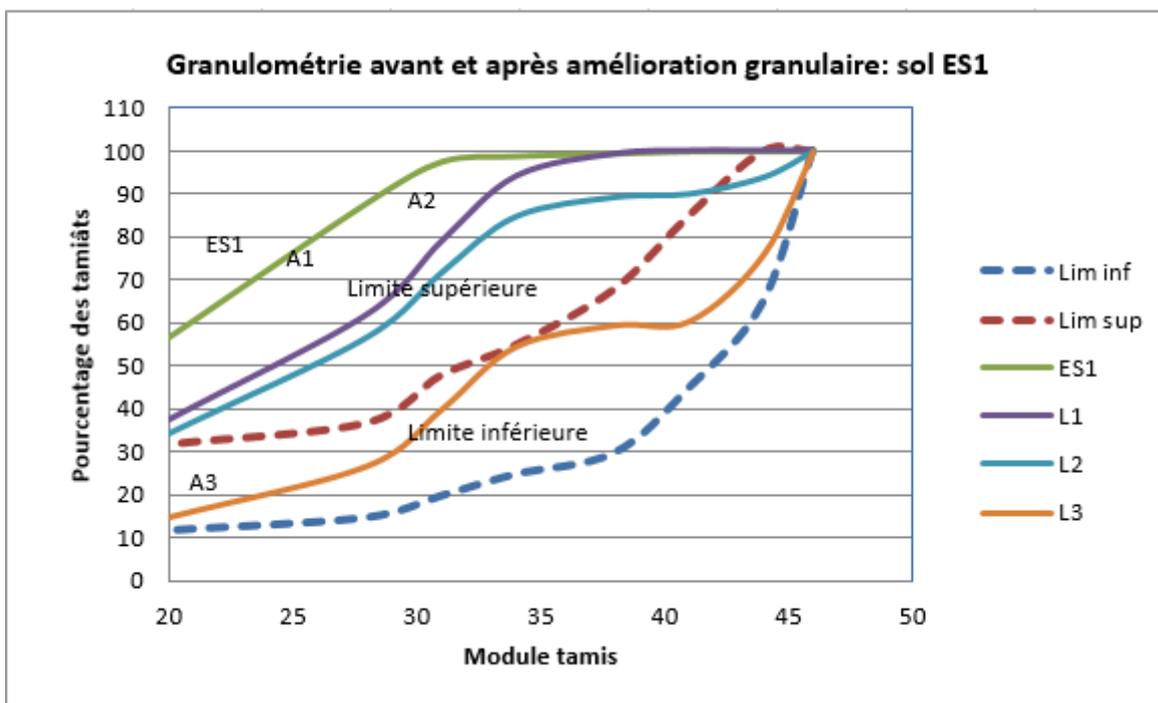


Figure 27: Evolution de la granularité de l'ES1

Les limites supérieures (Lim sup) et inférieures (Lim inf) délimitent le fuseau de la correction granulaire pour la couche de revêtement de la route en terre.

Même après compactage à l'état naturel, l'échantillon ES1 ne peut pas être utilisé aux différentes structures de la chaussée. Des améliorations de la granularité ont été effectuées pour avoir une meilleure performance géotechnique.

- Le mélange L1 avec 35% de sable 0/5 diminue fortement IP et augmente faiblement la portance et la résistance au poinçonnement. Ce mélange ne peut être utilisé qu'en couche de forme.
- La quantité de gravillon 10/20 concassé ajouté à ES1 permet d'augmenter la portance du mélange. Dans le cas du mélange L2, il diminue peu l'IP et améliore peu la portance, son utilisation reste toujours limitée à une couche de forme.
- Le mélange L3 est composé de 25% du sol ES1, 35% de sable 0/5 et 40% de gravillon 10/20. La courbe de mélange se place dans le fuseau granulaire. Du point de vue granularité, le mélange corrigé L3 peut être utilisé en couche de fondation, en couche de base et en couche de revêtement.

Dans la classification GTR :

Le mélange L1 peut être classifié comme A1, son IP est compris entre 0 à 12% et le passant à 80micron est de 37,4%.

Le mélange L2 reste toujours en classe A2

Le mélange L3 devient une classe B5 dans la classification GTR, son IP est aussi compris entre 0 à 12% dont le passant à 80 micron est de 14,8%.

Toute fois les pourcentages très élevés de sable et de gravier 75% au total ne sont pas adéquats. Ce qui veut dire qu'on devrait adopter la solution de matériaux d'emprunt ou de remplacement.

CHAPITRE X- ESSAIS SUR LE SITE 2 - ECHANTILLON ES2

X.1 - Traitement chimique

L'échantillon ES2 a été traité avec :

- Du ciment CEM I 42,5 seul (4%) : mélange C1
- De la chaux seule (6%) : mélange C2.
- Traitement mixte C3 et C4 (ciment et chaux) : mélange C3 et C4.

X.1.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges

Le tableau suivant présente les résultats de caractérisations de l'échantillon ES2 traité chimiquement.

Tableau 41: Résultats de caractérisations géotechniques pour ES2

	CEM %	CHAUX	Limites			Proctor		CBR _{im}		VBS	MO	PH
			WL	WP	IP	ρ_d	Wopm	4j	Ga			
			(%)	(%)	(%)	t/m3	(%)	(%)	(%)			
	42,5	Eteinte	(%)	(%)	(%)	t/m3	(%)	(%)	(%)	g/100g	(%)	
Mélange	0	0	94,7	53,8	40,9	1,39	33,9	15	1,6	1,5	5,2	6.20
C1	4	0	55,6	39,0	16,6	1,41	30,9	112	0,11	1,1		10,58
C2	0	6	70,0	44,0	26,0	1,44	31,7	95	0,13	1,0		11,27
C3	4	3,5	60,7	41,1	19,6	1,42	31,3	133	0,09	1,0		10.93
C4	5	5	48,6	35,7	12,9	1,43	33,0	172	0,06	0,9		11,02

X.1.2 - Aptitude aux traitements

Le tableau suivant présente les résultats des essais d'aptitudes au ciment et/ou à la chaux de l'échantillon ES2.

Tableau 42: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements de l'ES2

CEM %	CHAUX	APTITUDE		MODULE			
		Gv	Rtb	Rit	Eit	ν	Rt
42,5	Eteinte	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)		(Mpa)
4	0	25,4	0,03	0,14	1208	0,09	0,11
0	6	24,6	0,01	0,13	1360	0,1	0,10
4	3,5	1,4	0,22	0,29	2638	0,22	0,23
5	5	0,2	0,44	0,61	5265	0,37	0,49

X.1.3 - Interprétation des résultats

X.1.3.1 - Traitement au ciment

Le mélange C1 à 4% du ciment seul a une IP (16,6%) comprise entre 15 à 40 montre qu'il est encore plastique, sa classe GTR est A2.

La résistance à la compression diamétrale R_{tb} ou celle à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C est très faible. De plus, un gonflement G_v de 25,4% par rapport au volume de l'éprouvette a été constaté.

On a : $R_{tb} \leq 0,1 \text{ Mpa}$ et $G_v \geq 10\%$

Sa résistance à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C et son module d'élasticité E_{it} sont très faibles.

On a donc : $R_t = 0,11 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 1208 \text{ Mpa}$

Au vue de ces résultats, plus précisément du côté portance le traitement au ciment seul à 4% permettrait l'utilisation de ES2 dans plusieurs domaines en technique routière. Par rapport au gonflement volumique de 25,4%, ce résultat serait à craindre au niveau des retraits et des fissures.

Certes, vis-à-vis de ces caractéristiques mécaniques (G_v , R_{tb} , R_t et E_{it}), on peut dire que ce dosage en ciment n'est pas adapté pour le traitement du sol ES2.

X.1.3.2 - Traitement à la chaux

Le mélange C2 à 6% de la chaux a environ une même caractéristique géotechnique que le ciment. Il a seulement une portance légèrement inférieure et une IP supérieure par rapport au ciment.

La résistance à la compression diamétrale R_{tb} ou à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C est faible. De plus, un gonflement G_v de 24,6% par rapport au volume de l'éprouvette a été constaté.

On a : $R_{tb} \leq 0,1 \text{ Mpa}$ et $G_v \geq 10\%$

Sa résistance à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C très faible et son module d'élasticité E_{it} a une valeur faible.

On a donc : $R_t = 0,10 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 1360 \text{ Mpa}$

Au vue de ces résultats, plus précisément du côté portance le traitement à la chaux seul à 6% permettrait aussi l'utilisation de ES2 dans plusieurs domaines en technique routière. Par rapport au gonflement volumique de 24,6%, ce résultat serait à craindre au niveau des retraits et des fissures.

Certes, vis-à-vis de ces caractéristiques mécaniques (G_v , R_{tb} , R_t et E_{it}), on peut dire que ce dosage en chaux n'est pas adapté pour le traitement du sol ES2.

X.1.3.3 -Traitement mixte chaux-ciment

Le traitement mixte améliore la portance et la plasticité du mélange. Pour le mélange C3, l'indice CBR peut atteindre jusqu'à 133% et l'indice de plasticité IP (19,6%) comprise entre 15 à 40. Ces valeurs seront de plus en plus améliorées pour le mélange C4.

La résistance à la compression diamétrale R_{tb} ou à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C est significative. De même, le gonflement G_v augmente jusqu'à 1,4% pour C3 et 0,2% pour C4 par rapport au volume de l'éprouvette.

On a donc : $R_{tb} \geq 0,2$ Mpa et $G_v \leq 5\%$ (pour C3 et C4)

Sa résistance à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C et son module d'élasticité E_{it} sont satisfaisantes.

On a donc : $R_t = 0,23$ Mpa et $E_{it} = 2638$ Mpa (mélange C3)

$R_t = 0,49$ Mpa et $E_{it} = 5265$ Mpa (mélange C4)

Vis-à-vis de ces caractéristiques mécaniques (G_v , R_{tb} , R_t et E_{it}), ce type de traitement mixte est adapté aux différentes structures de la chaussée sans restriction.

Les courbes suivantes permettent de visualiser facilement les résultats de traitements chimiques sur l'échantillon ES2.

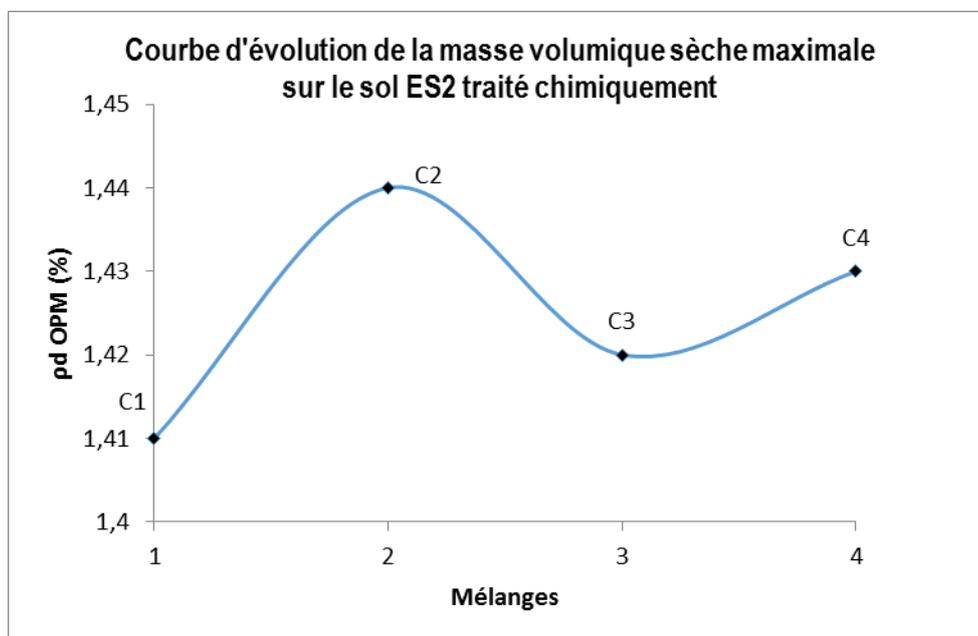


Figure 28: Courbe d'évolution de la masse volumique sèche maximale du sol ES2 traité

Cette courbe représente la variation de la masse volumique sèche maximale en fonction des mélanges C1, C2, C3, C4 et C5. Ces mélanges augmentent la valeur de cette masse volumique dont le maximum se trouve sur C2 à 6% de la chaux et le minimum sur C1 à 4% du ciment.

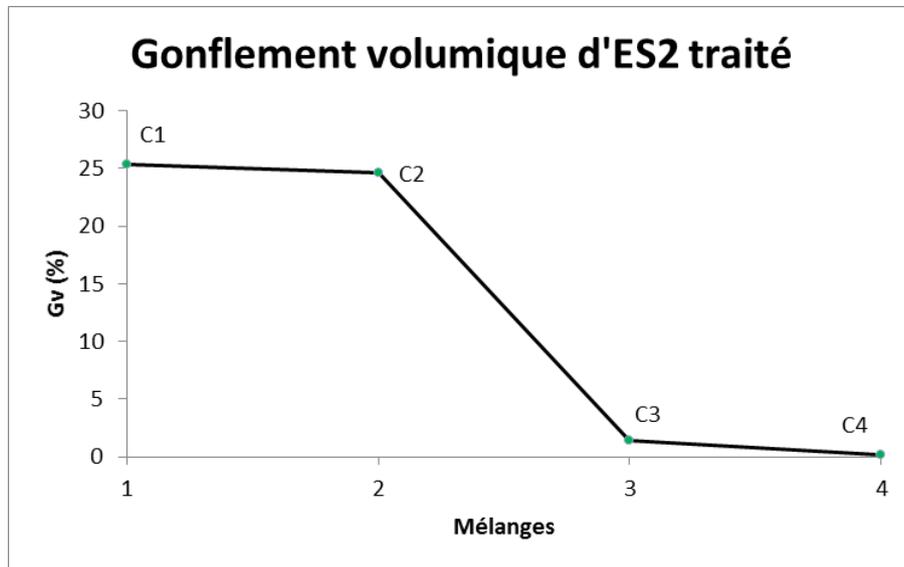


Figure 29: Variation des gonflements volumiques des mélanges – ES2 traité

Cette courbe représente les gonflements volumétriques en fonction des mélanges C1, C2, C3, C4 et C5 de l'échantillon ES2. La teneur en ciment du mélange C1 et en chaux 6% du mélange C2 donnent un gonflement non conforme par rapport au traitement. Les traitements mixtes (C3 et C4) donnent des résultats satisfaisants quant au gonflement.

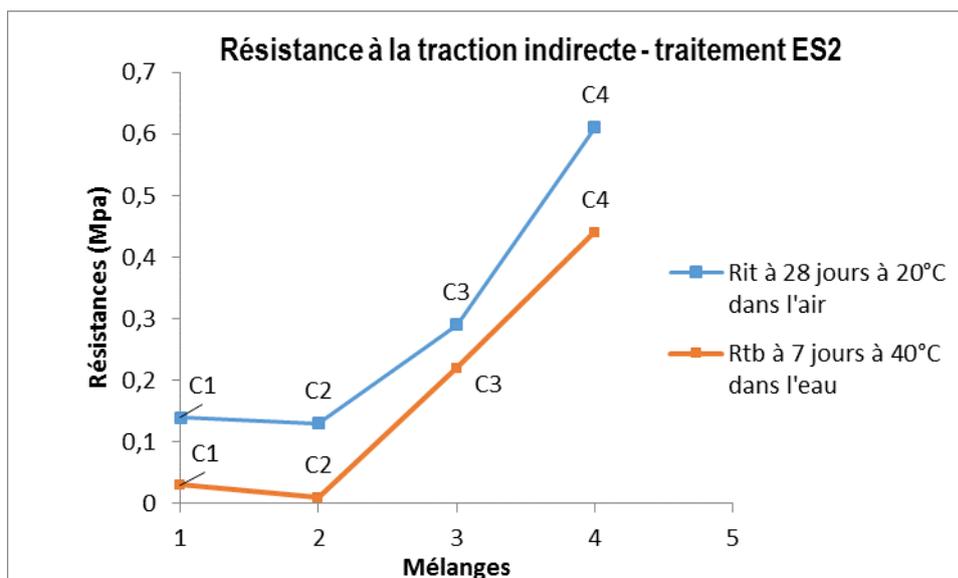


Figure 30: Résistance à la traction directe - traitement chimique ES2

Cette courbe représente les résistances à la traction indirecte de l'échantillon ES2 en fonction des mélanges cités précédemment. La courbe en bleu marque la variation des résultats de résistances à la traction indirecte d'âge 28 jours à la température de 20°C à l'air et celle en rouge est d'âge 7 jours dans l'eau de 40°C. Le traitement simple au ciment et mixte résistent mieux à l'eau que ce à la chaux seule.

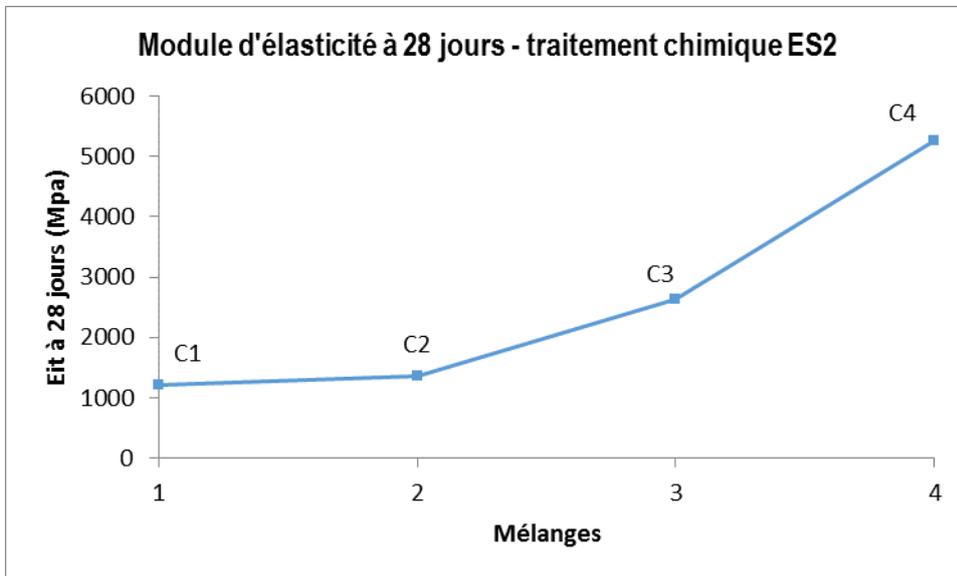


Figure 31: Module d'élasticité des mélanges à 28 jours – ES2 traité

Le traitement mixte pour les mélanges C3 et C4 ont un module d'élasticité les plus élevées. Dans le cas du traitement simple, C1 prend la valeur minimale.

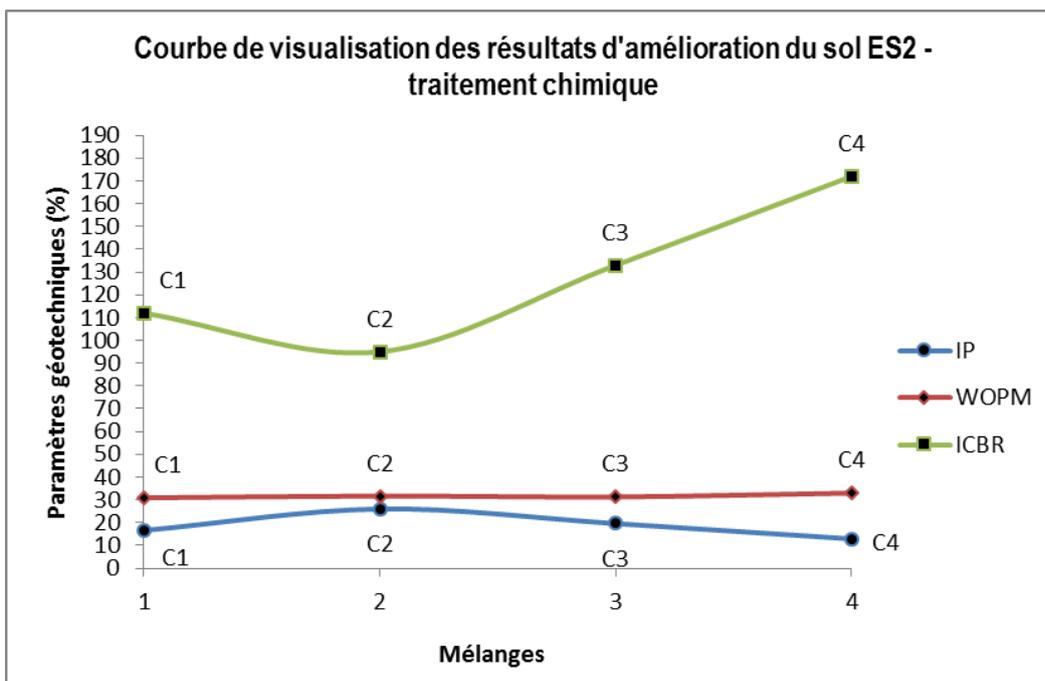


Figure 32: Courbe d'évolution des résultats d'améliorations du sol ES2 traité

Cette courbe représente quelques paramètres géotechniques en fonction des mélanges C1, C2, C3 et C4. Ces mélanges améliorent la capacité portante, l'argilosité et diminuent peu la teneur en eau optimum. Par rapport à la portance, ces cinq mélanges pourraient supporter toutes les différentes couches de la chaussée. Dans ce cas, des précautions devraient prendre sur C1 et C2 face au gonflement volumétrique.

X.2 - Traitement mécanique : Lithostabilisation

Des mélanges ont été réalisés avec différents pourcentages de sable et de gravillon pour être apte en une route en terre. Les mélanges obtenus devraient donc aptes pour une couche de revêtement, couche de base et une couche de fondation d'une route en terre.

X.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges

Les tableaux 43 et 44 suivants affichent les résultats de caractérisations géotechniques après corrections granulaires de l'échantillon ES2

Tableau 43: Résultats d'analyses granulométriques de lithostabilisation pour ES2

Ech	Sol %	Litho-stab			w% Nat	Dm	20	10	5	2	1	0,2	0,08	
		Sable dune (%)	Gravillon				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
			5/10	10/20										
ES2	100	0	0	0	38,9	5	100,0	100,0	99,5	98,7	97,6	61,1	93,0	
L4	80	20	0	0		6,3	100,0	100,0	99,4	96,0	87,1	76,4	74,8	
L5	70	30	0	0		6,3	100,0	100,0	99,3	94,6	81,8	67,4	65,7	
L6	60	40	0	0		6,3	100,0	100,0	99,2	93,3	76,4	58,4	56,6	
L7	25	25	20	30		20,0	82,0	69,3	52,2	46,5	35,9	25,1	24	

Tableau 44: Résultats des essais de plasticité, Proctor et CBR de la lithostabilisation pour ES2

Ech	Limites			Proctor		CBR _{im}	
	WL	WP	IP	ρ_d OPM	Wopm	4j	Ga
	(%)	(%)	(%)	t/m3	(%)	(%)	(%)
ES2	94,7	53,8	40,9	1,39	33,9	15	1,6
L4	91,9	51,3	40,5	1,42	28,2	22	1,3
L5	80,7	50,3	39,3	1,44	25,4	27	1,1
L6	83,0	48,4	34,6	1,50	23,1	31	0,8
L7	60,1	43,4	17,3	1,93	13,2	84	0,3

X.2.2 - Interprétations des résultats

Ces résultats permettent de tracer les courbes dans la figure 33 ci-après.

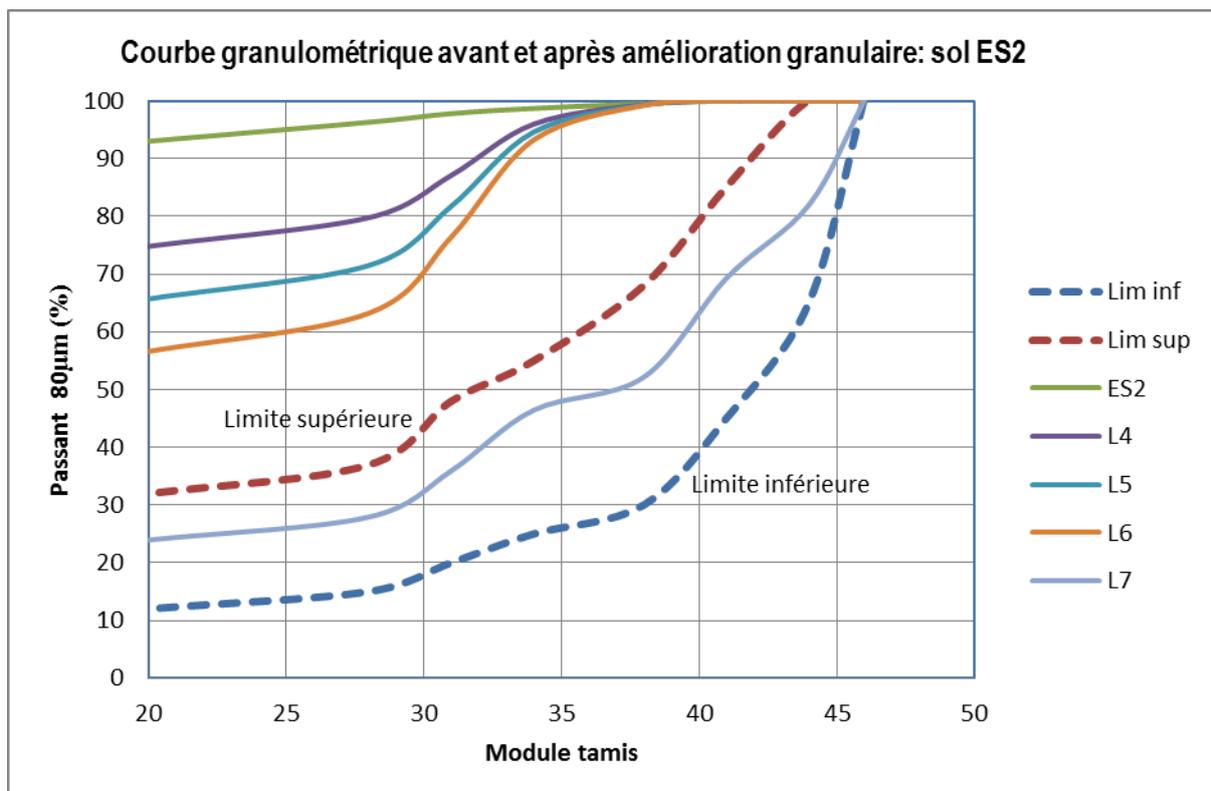


Figure 33: Evolution de la granularité de l'ES2

Les limites supérieures (Lim sup) et inférieures (Lim inf) en tirée délimitent le fuseau de la correction granulaire.

Du point de vue granulométrique, l'échantillon ES2 ne peut pas être utilisé aux différentes structures de la chaussée. Des améliorations de la granularité ont été effectuées pour avoir une meilleure performance géotechnique.

Les mélanges L4, L5, L6 n'affectent pas sur les comportements géotechniques de ce sol. L'indice de plasticité varie très peu de même l'indice CBR reste faible. Ces mélanges conviennent seulement sur la couche de forme.

La quantité des gravillons 5/10 et 10/20 concassés ajoutés à ES2 du mélange L7 permet d'augmenter la portance. Dans ce cas, l'IP s'est améliorée et la classe GTR du mélange est de B5.

Dans la classification GTR :

- Le mélange L4 reste toujours de classe A4, son IP est supérieure à 40% et le passant à 80 μ m est de 74,8%. Il est très plastique.
- ES2 devient A3 pour le mélange L5 à 65,7% du passant à 80 μ m. Son indice de plasticité reste encore très significatif.
- Le mélange L6 appartient à la classe A2 avec 56,6% des particules fines dont l'IP est comprise entre 15 à 40%. Ce mélange a un comportement plastique.
- Quant au mélange L7, il est d'une classe B5 dans la classification GTR, son IP est comprise entre 12 à 25 dont le passant à 80 micron est de 24%. Il est peu plastique.

La courbe de mélange L7 se place entre le fuseau granulaire. Ce mélange L7 répond aux critères d'une route en terre souhaitée et pourrait être faite comme une couche de fondation, une couche de base et un revêtement. Ce mélange demande 25% du type de sol ES2, 25% de sable dunaire et 50% de gravillon.

Toute fois les pourcentages très élevés de sable et des gravillons 75% au total ne sont pas adéquats. Ce qui veut dire qu'on devrait adopter la solution de matériaux d'emprunt ou de remplacement.

CHAPITRE XI - ESSAIS SUR LE SITE 3 - ECHANTILLON ES3

XI.1 - Traitement chimique

XI.1.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges

Les résultats de caractérisations de l'échantillon ES3 traité chimiquement sont affichés dans le tableau ci-après.

Tableau 45: Résultats de caractérisations géotechniques du traitement chimique pour ES3

Ech	CEM %	CHA	Limites			Proctor		CBR _{im}		VBS	MO	PH
			WL	WP	IP	P_d	Wopm	4j	Ga			
	42,5	Eteint	(%)	(%)	(%)	T/m3	(%)	(%)	(%)	g/100g	(%)	
	0	0	41,5	22,0	19,5	1,8	14,1	21,0	0,7	1,7	4,8	5.87
D1	4	0	35,4	23,2	12,2	1,78	14,2	52	0,04	0,7		9,80
D2	5	0	38,0	27,1	10,9	1,8	14,2	65,0	0,1	0,5		10.34
D3	0	6	38,6	30,5	8,1	1,8	15,1	55,0	0,0	0,3		11.22
D4	3	3	45,5	28,2	17,3	1,8	14,3	59,0	0,0	0,6		10,49
D5	4	4	35,9	24,8	11,1	1,8	14,9	85,0	0,0	0,4		10.8

XI.1.2 - Aptitude aux traitements

Le tableau 46 suivant montre les résultats des essais d'aptitudes

Tableau 46: Résultats des essais d'aptitudes aux traitements pour ES3

CEM %	CHA	APTITUDE		MODULE			
		Gv	Rtb	Rit	Eit	ν	Rt
42,5	Eteint	(%)	(mpa)	(mpa)	(mpa)		(mpa)
4	0	0,6	0,02	0,07	748	0,13	0,06
5	0	0,4	0,03	0,09	986	0,11	0,07
0	6	1,7	0,01	0,11	894	0,08	0,09
3	3	4,6	0,03	0,13	1120	0,1	0,11
4	4	4,8	0,03	0,16	1385	0,15	0,14

XI.1.3 - Interprétation des résultats

XI.1.3.1 - Traitement au ciment

Le mélange D1 et D2 ont une IP comprise entre 5 à 12. Ces valeurs montrent que ces mélanges sont moyennement plastiques. Leurs portances sont très élevées avec un indice CBR ≥ 25 et une classe GTR A2. Quant à ces résultats, le traitement seul au ciment (4% ou 5%) pourrait utiliser comme couche de forme et comme couche de fondation.

Leurs résistances à la compression diamétrale R_{tb} ou celle à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C sont très faible. Ces mélanges présentent un gonflement G_v par rapport au volume de l'éprouvette conforme à la norme.

On a : $R_{tb} \leq 0,1 \text{ Mpa}$ et $G_v \leq 5\%$

Leurs résistances à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C et leurs modules d'élasticité E_{it} sont moins faibles.

On a donc : $R_t = 0,06 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 748 \text{ Mpa}$ (Mélange D1)

$R_t = 0,07 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 986 \text{ Mpa}$ (Mélange D2)

Vis-à-vis de ces caractéristiques mécaniques (G_v , R_{tb} , R_t et E_{it}), ces dosages en ciment ne sont pas satisfaisantes pour recevoir la couche de base et la couche de revêtement.

XI.1.3.2 - Traitement à la chaux

Le mélange D3 à 6% de chaux a environ une même caractéristique géotechnique que le ciment. Il a seulement une portance légèrement inférieure et une IP inférieure par rapport au ciment.

La résistance à la compression diamétrale R_{tb} ou à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C est très faible. Ce mélange présente un gonflement G_v par rapport au volume de l'éprouvette conforme à la norme.

On a : $R_{tb} \leq 0,1 \text{ Mpa}$ et $G_v \leq 5\%$

Sa résistance à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C et son module d'élasticité E_{it} s'améliore.

On a donc : $R_t = 0,09 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 986 \text{ Mpa}$

Vis-à-vis de ces caractéristiques mécaniques (G_v , R_{TB} , R_t et E_{it}), ce dosage en chaux de 6% ne peut être utilisé qu'en couche de fondation.

XI.1.3.3 - Traitement mixte Chaux-ciment

Le traitement mixte D4 améliore peu la portance et la plasticité. Seulement le mélange D5 prend effet sur l'augmentation de la portance et la diminution de la plasticité. Son indice CBR peut atteindre jusqu'à 85%

et l'indice de plasticité IP comprise entre 15 à 40. Ce dernier mélange pourrait être utilisé comme couche de forme, comme couche de fondation et comme couche de base.

La résistance à la compression diamétrale R_{tb} ou à la traction indirecte à 7 jours dans l'eau 40°C reste faible. Le gonflement volumique G_v augmente par rapport aux autres mélanges.

On a donc : $RTB \geq 0,2 \text{ Mpa}$ et $G_v \leq 5\%$ (pour D4 et D5)

La résistance à la traction directe R_t à 28 jours dans l'air conditionnée à 20°C et son module d'élasticité E_{it} sont insatisfaisantes.

On a donc : $R_t = 0,11 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 1120 \text{ Mpa}$ (Mélange D4)

$R_t = 0,14 \text{ Mpa}$ et $E_{it} = 1385 \text{ Mpa}$ (Mélange D5)

Au vue de ces résultats, plus précisément du côté portance le traitement mixte D5 permettrait l'utilisation de ES3 dans plusieurs domaines en technique routière.

Les courbes suivantes permettent de visualiser facilement les résultats de traitements chimiques sur l'échantillon ES3.

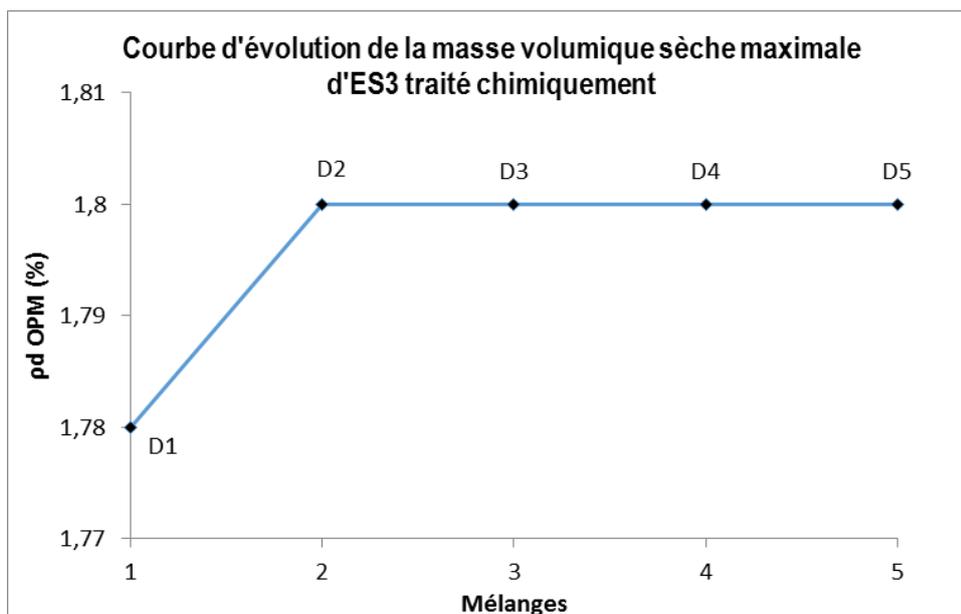


Figure 34: Variation de la masse volumique des mélanges - ES3 traité

Cette courbe représente la variation de la masse volumique sèche maximale en fonction des mélanges D1, D2, D3, D4 et D5. Ces mélanges n'ont pas d'impact sur la variation de la masse volumique.

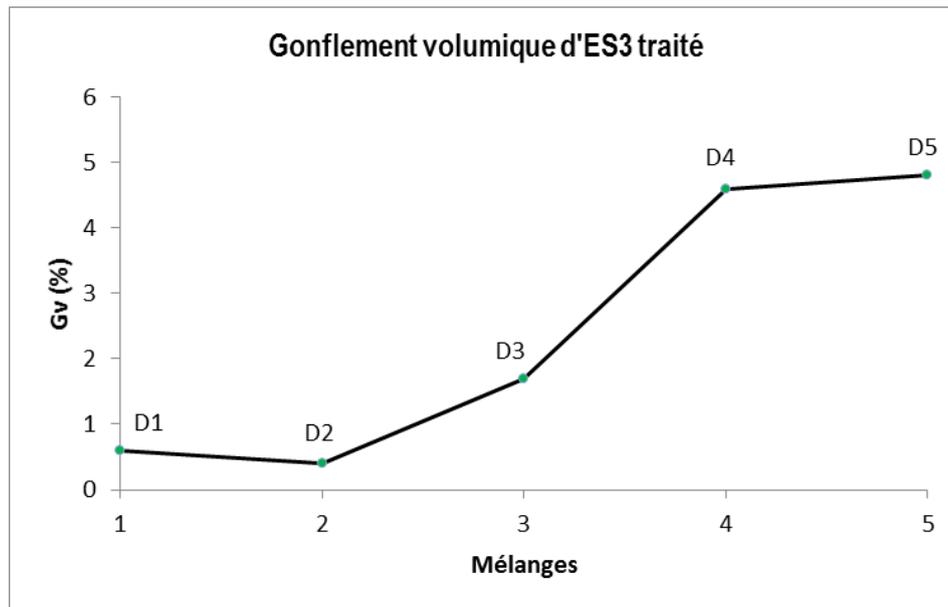


Figure 35: Gonflement volumique d'ES3 traité

Cette courbe représente les gonflements volumétriques en fonction des mélanges D1, D2, D3, D4 et D5 de l'échantillon ES3. Les traitements mixtes (D4 et D5) ont un gonflement beaucoup plus élevé par rapport aux traitements simples. Le mélange D2 a le minimum de gonflement.

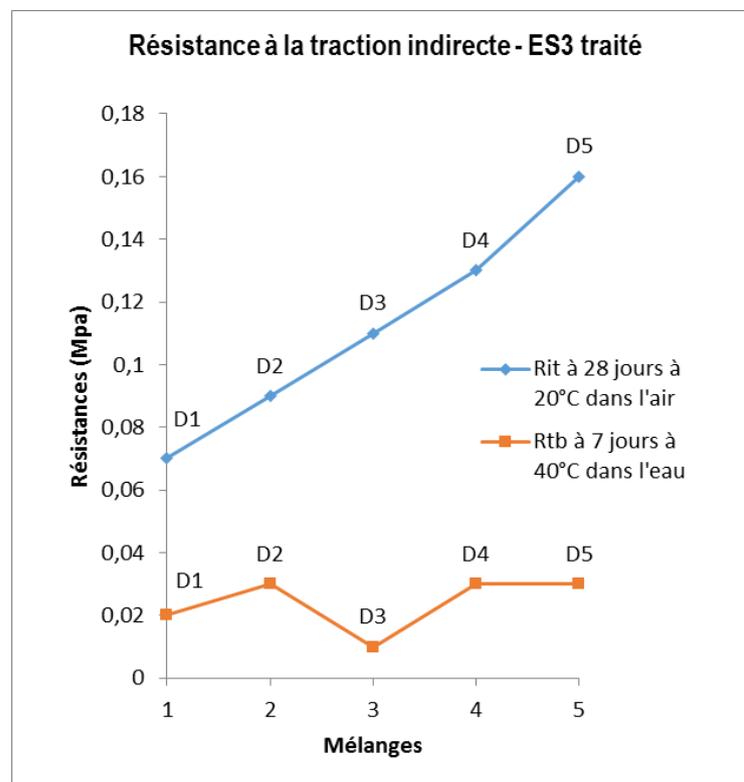


Figure 36: Résistance à la traction indirecte - ES3 traité

Cette courbe représente les résistances à la traction indirecte de l'échantillon ES2 en fonction des mélanges cités précédemment. La courbe en bleue marque la variation des résultats de résistances à la traction indirecte à 28 jours à la température de 20°C à l'air et celle en rouge est à 7 jours dans l'eau de 40°C. Le traitement simple au ciment et mixte résistent mieux à l'eau que ce à la chaux seule.

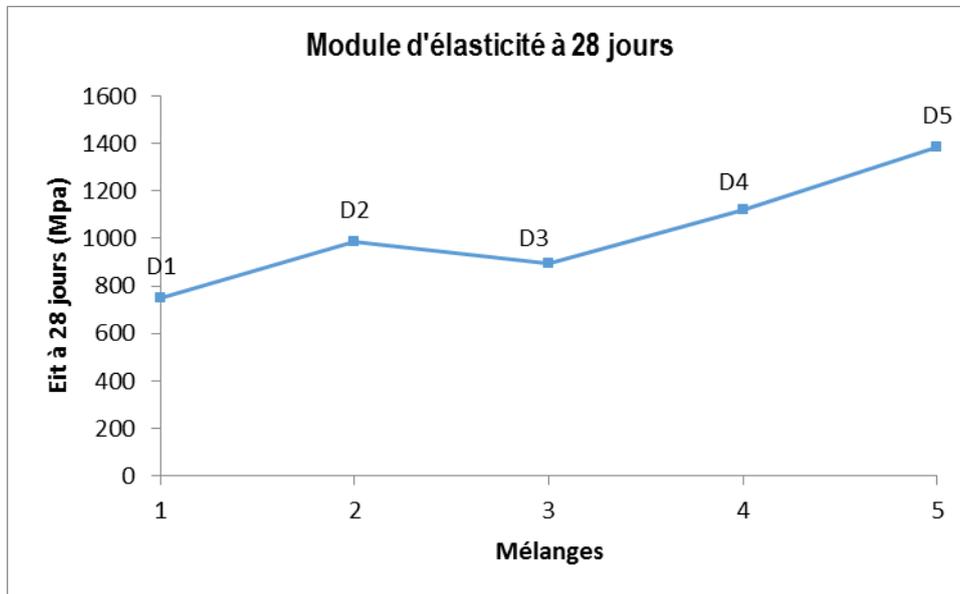


Figure 37: Module d'élasticité à 28 jours - ES3 traité

Le traitement mixte pour les mélanges D4 et D5 ont des modules d'élasticités les plus élevés. Dans le cas du traitement simple, D1 prend la valeur minimale.

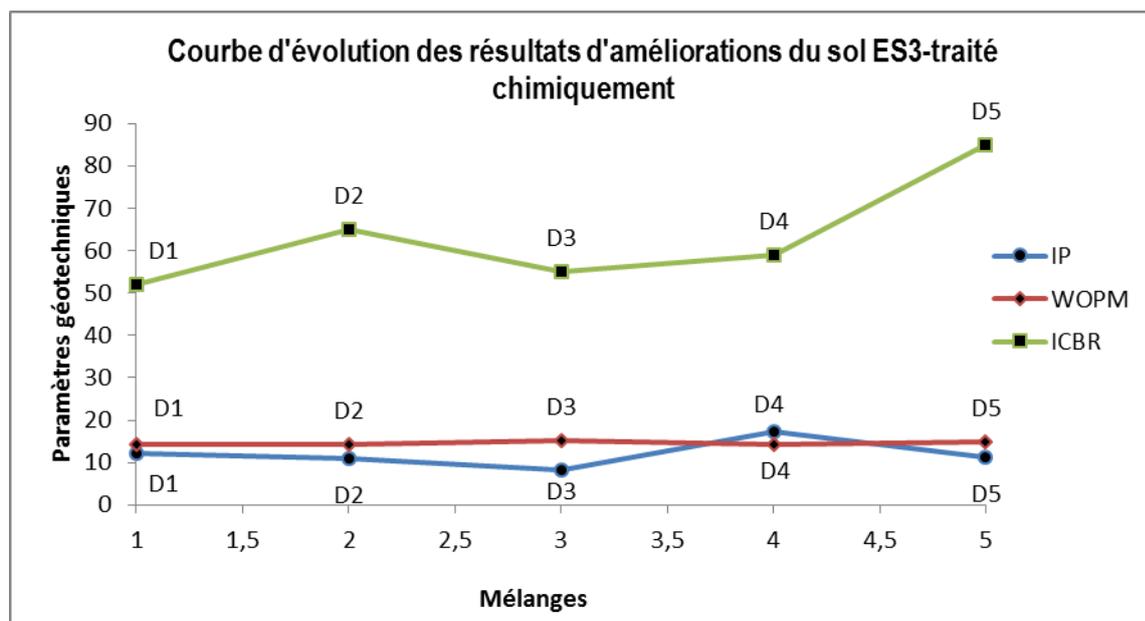


Figure 38: Evolution des résultats d'amélioration du sol ES3 - traitement chimique

Cette courbe représente quelques paramètres géotechniques en fonction des mélanges D1, D2, D3, D4 et D5. Ces mélanges améliorent la capacité portante, l'argilosité et augmentent peu la teneur en eau optimum. Par rapport à la portance et aux autres comportements géotechniques, le traitement de l'échantillon ES3 au ciment à 5% est le mieux adapté pour une couche de fondation. Seulement le traitement mixte D5 qui est adapté pour la couche de base et les autres structures.

XI.2 - Traitement mécanique : Lithostabilisation

Des mélanges ont été réalisés avec différents pourcentages de sable et de gravillon pour être apte en une route en terre. Les mélanges obtenus devraient donc aptes pour une couche de revêtement, couche de base et une couche de fondation d'une route en terre.

XI.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges

Les tableaux 47 et 48 représentent les résultats de caractérisations de traitement mécanique de l'échantillon du sol ES3

Tableau 47: Résultats de caractérisations géotechniques de lithostabilisation pour ES3

Ech	Lithostabilisation			w% Nat	Dm	31,5	20	10	5	2	1	0,2	0,08
	Sable dune 0/5	Gravillon 5/10	Gravillon 10/20			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
ES3	0	0	0	23,7	2,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	95,4	56,4	50,9
L8	5	10	20		20	91,1	86,4	81,3	79,8	77,2	70,8	59,1	45,8
L9	7	24	26		20	100,0	84,0	73,1	53,0	49,4	44,6	24,9	18,0

Tableau 48: Résultats des essais de plasticité, Proctor et CBR de la lithostabilisation pour ES3

Ech	w%	Limites			Proctor		CBR _{im}		GTR
	Nat	WL	WP	IP	ρ_d	Wopm	4j	Ga	
		(%)	(%)	(%)	t/m3	(%)	(%)	(%)	
ES3	23,7	41,5	22,0	19,5	1,80	14,1	21	0,7	A2
L8		38,5	27,2	11,3	1,92	12,8	73	0,28	A1
L9		38,4	28,3	10,1	1,98	11,2	98	0,15	B5

XI.2.2 - Interprétations des résultats

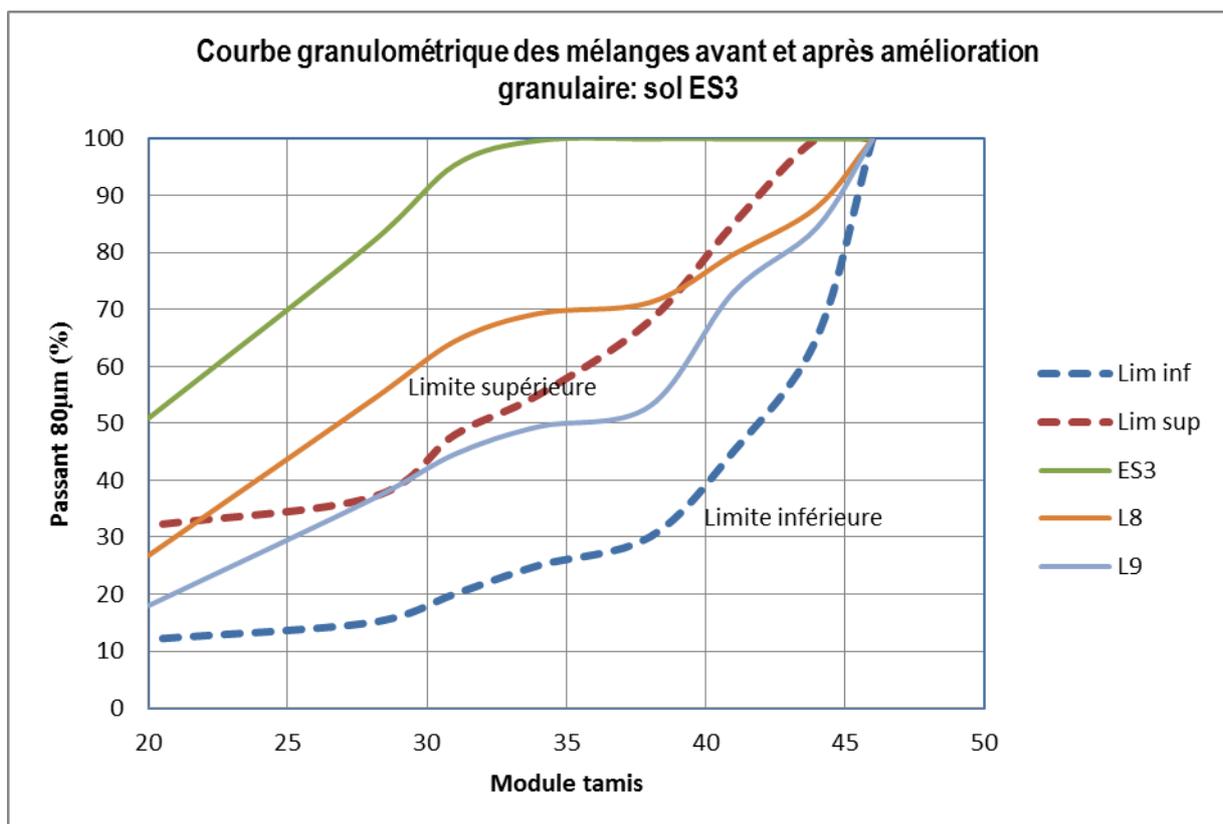


Figure 39: Evolution de la granularité de l'ES3

Les limites supérieures (Lim sup) et inférieures (Lim inf) en tirées délimitent le fuseau de la correction granulaire.

Du point de vue granulométrique, l'échantillon ES3 ne peut pas être utilisé comme couche stable et durable d'une route en terre. Des améliorations de la granularité ont été effectuées pour avoir une meilleure performance géotechnique.

- Mélange L8 : l'ajout de 5% du sable, 10% du gravillon 5/10 et 20% de 10/20 permettent d'augmenter l'indice de portance et d'améliorer l'IP de ES3. Ce mélange convient seulement sur la couche de forme et la couche de fondation.

- Le mélange répondant aux critères d'une route en terre est ce de L9 composé de 7% de sable 0/5, 24% de gravillon 5/10 et 26% de gravillon 10/20. Sa courbe granulométrique se place entre la limite inférieure et la limite supérieure du fuseau. Ses caractéristiques géotechniques le permettent de convenir à une couche de forme, couche de fondation, couche de base et à une couche de revêtement.

Dans la classification GTR :

Le mélange L8 est de classe A1, son IP est comprise entre 0% à 12% dont le passant à 80µm est de 45,8%. Il est moyennement plastique.

ES3 devient B5 pour le mélange L9 à 18,0% du passant à 80µm. Son indice de plasticité est aussi comprise entre 0 à 12%. Il est peu plastique.

Toute fois les pourcentages très élevés des apports (57%) rendent ce type de traitement inadéquat. Ce qui veut dire qu'on devrait adopter la solution de matériaux d'emprunt ou de remplacement.

CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'AMELIORATIONS

Deux techniques de traitements ont été adoptées pour l'amélioration de la durabilité de la route en terre étudiée.

Le cas du site N°1, 6% de la chaux seule ou 4% du ciment associé à 4% de chaux pourraient améliorer les comportements géotechniques supportant seulement la couche de fondation. Pour répondre à toutes les différentes structures de la chaussée, la technique de lithostabilisation a été adoptée en apportant 35% de sable 0/5 et 40% du gravillon 10/20.

Le site N°2 pourrait être amélioré en supportant ces différentes structures de la chaussée par le traitement mixte à 4% du ciment associé à 3.5% de chaux éteinte ou par la lithostabilisation en apportant 25% du sable 0/5, 20% du gravillon 5/10 et 30% de 10/20.

Le sol dans le site N°3 pourrait être à son tour amélioré avec 5% du ciment seul pour la couche de fondation et au traitement mixte de 4% ou par la correction granulaire en ajoutant 7% du sable dunaire, 24% du gravillon 5/10 et 25% de 10/20 pour toutes les structures de la chaussée.

Les traitements mécaniques de ces trois échantillons du sol sont inadéquats face aux pourcentages très élevés des apports. Donc, on devrait adopter la solution des matériaux d'emprunts ou de remplacement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Les études des propriétés physico-chimiques, minéralogiques et géotechniques des sols prélevés le long de la route en terre de Mahatsara à Ambodipont de la commune rurale d'Ampohibe dans le District d'Antalaha montrent que :

L'échantillon ES1 dans le site N°1 est constitué de 9.3% d'oxyde de fer, 1.56% d'oxyde de titane, 18.60% d'oxyde d'aluminium, 55.12% de silice libre, 0.84% de chaux libre et 2.60% en masse d'oxyde de magnésium. Il s'agit d'un limon argileux sableux contenant des minéraux argileux sensible à l'eau, un sol faiblement organique et acide. Dans la classification GTR, ce sol est de classe A2m avec des comportements géotechniques médiocres. Sa portance ne permette pas de supporter les différentes structures de la chaussée.

Un traitement avec 6% de chaux seule ou 4% du ciment associé à 4% de chaux pourrait améliorer ses propriétés géotechniques et convenir seulement pour une couche de fondation. Pour répondre aux différentes couches d'une chaussée, le mieux est d'adopter la technique de lithostabilisation en apportant 35% de sable dunaire et 40% du gravillon 10/20.

L'échantillon ES2 dans le site N°2 est constitué de 6.19% d'oxyde de fer, 1.96% d'oxyde de titane, 40.60% d'oxyde d'aluminium, 34.91% de silice libre, 0.53% de chaux libre et 0.16% en masse d'oxyde de magnésium. Il s'agit d'une argile limoneuse contenant aussi des minéraux argileux sensible à l'eau, un sol faiblement organique et acide. Dans la classification GTR, ce sol est de classe A4 avec des comportements géotechniques très critiques au niveau de l'argilosité. Sa portance ne permette pas de supporter les différentes structures de la chaussée.

Ce site N°2 pourrait être amélioré en supportant ces différentes structures par le traitement mixte à 4% du ciment associé à 3.5% de chaux éteinte ou par la lithostabilisation en ajoutant 25% du sable dunaire, 20% du gravillon 5/10 et 30% de 10/20.

L'échantillon ES3 dans le site N°3 est constitué de 9.49% d'oxyde de fer, 0.28% d'oxyde de titane, 6.36% d'oxyde d'aluminium, 68.46% de silice libre, 1.11% de chaux libre et 3.18% en masse d'oxyde de magnésium. Il s'agit d'un sable limoneux contenant peu des minéraux argileux sensible à l'eau, un sol faiblement organique et moyennement acide. Dans la classification GTR, ce sol est de classe A2th avec des comportements géotechniques moyens. Sa portance ne permette pas toujours de supporter les différentes structures de la chaussée.

Ce site N°3 pourrait être à son tour amélioré avec 5% du ciment seul pour la couche de fondation et au traitement mixte de 4% ou par la correction granulaire en ajoutant 7% du sable dunaire, 24% du gravillon 5/10 et 25% de 10/20 pour toutes les structures de la chaussée.

En générale, le traitement mixte sol-chaux-ciment est plus efficace par rapport au traitement simple. A part ce traitement chimique, les traitements mécaniques de ces trois échantillons du sol sont inadéquats face aux pourcentages très élevés des apports. Donc, on devrait adopter la solution des matériaux d'emprunts ou de remplacement.

Comme perspective, ces résultats seraient beaucoup plus meilleurs en combinant la technique de la litho stabilisation et le traitement chimique. Ce traitement combiné pourrait éviter l'adoption de la nécessité des matériaux d'emprunts.

Généralement, ces techniques d'améliorations sont écologiques et à coût réduit. Le travail que nous attend c'est de multiplier les usines de productions d'un produit de traitement mixte à base de la chaux et du ciment ou autre en exploitant nos matériaux locaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

➤ Références bibliographiques

- [1]. Monographie de la région SAVA, CREAM, février 2013, 210 pages
- [2]. Plan de Préparation aux Urgences (PPU) de la Commune Rurale d'Ampohibe, CARE International. Programme Nord, Projet DIPECHO, révision 2013, 36 pages.
- [3]. G. OLIVARI, « Mécanique des sols général », 376 pages
- [4]. Younoussa MILLOGO (2008). Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route). Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, 142 pages.
- [5]. Tangi LE BORGNE (2010). Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Thèse de doctorat, Université Institut National Polytechnique de Lorraine, 217 pages.
- [6]. J.M TCHOUANI NANA (1999), M.a.J. par M.CALLAUD (2004). Cours de Mécanique des sols Tome 1 « Propriétés des sols », 137 pages.
- [7]. Lucile SAUSSAYE. (2012). Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification. Thèse de doctorat, Université de caen, 315 pages.
- [9]. I.A. VOÏNOVITCH, l'analyse minéralogique des sols argileux, édition EYROLLES 1971. 91 pages
- [11]. LCPC-SETRA 2000, guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, fascicule I, 2^{ème} édition, 85 pages.
- [13] : Marie de Cock (2003). Performance des matériaux de chaussées latéritiques. Travail pratique de diplôme, EPFL. 59 pages
- [14]. LCPC-SETRA 2000, guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », 240 pages
- [15]. Terrassements et assises de chaussées, cim beton, CT-70 ,147 pages
- [16]. Tangi LE BORGNE (2010). Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Thèse de doctorat, Université Institut National Polytechnique de Lorraine, 217 pages.
- [17]. CEBTP (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère des relations extérieures - coopération et développement de la république française, 157 pages.
- [18]. Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, CRR, 2010.96 pages
- [19]. M. Massamba NDIAYE (2013). Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse de doctorat, Université cheikh Anta Diop de Dakar. 147 pages.
- [20]. Analyse des roches, méthodes M. Robin

- [21]. Toe J.M. (2007). Utilisation de la technique de la lithostabilisation en assise de chaussée. Une expérience de chantier. Présentation à la Conférence des Jeunes Géotechniciens Africains, Tunis, 16-18 mars 2007. Présentation PowerPoint.
- [22]. Norme NF P 94-056 et 057 Sols – Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage et par sédimentation.
- [23]. Norme NF P 94-051 Sols – Reconnaissance et essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- [24]. Norme NF P 94-068 Sols - Reconnaissance et essais - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- [25]. Norme NF P 94-054 Sols - Reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols.
- [26]. Norme NF P 94-050 Sols - Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage
- [27]. Norme NF P 94-093 Sols – Reconnaissance et essai de compactage Proctor – Détermination des références de compactage d’un matériau – Essai Proctor modifié – Essai Proctor normal.
- [28]. Norme NF P 94-078 Sols – Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- [29]. Norme NF P 18-598 Granulats – Equivalent de sable
- [30]. Norme NF P 94-100 Sols - Reconnaissance et essais – Essai d’évaluation de l’aptitude d’un sol au traitement.
- [31]. Norme NF EN 13286 – 42 Mélange traités et mélanges non traité aux liants hydrauliques - Méthode d’essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélange traité aux liants hydrauliques.
- [32]. Norme NF EN 13286 – 43 Mélange traités et mélanges non traité aux liants hydrauliques - Méthode d’essai pour la détermination du module d’élasticité des mélange traité aux liants hydrauliques.

➤ **Références webographiques**

- [8]. www.theses.ulaval.ca/2010/27827/27827.pdf, Youdjari Djonkamla, mémoire de maîtrise, 2010, 115 pages.
- [10]. blog.crdp-versailles.fr/...rpretation_AnalyseSol_.pdf - Cours de « Fertilisation des sols en agriculture biologique » / Cégep de Victoriaville / Ghislain Jutras - 1 guide pour l’interprétation d’une analyse de sol (consultation 05 février 2015).
- [12]. <https://www.polymtl.ca/cppm/docs/notesCours/224/Presentation-Chapitre2.pdf> (consultation 6 juin 2014)

[33].<http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x31-130/qualite-des-sols-methodes-chimiques-determination-de-la-capacite-d-echange-cationique-cec-et-des-cations-extractibles/article/757208/fa049698> (document en ligne, consultation 2 juin 2015)

[34].https://hal.inria.fr/file/index/docid/501419/filename/These_Yigzaw.pdf (document en ligne, consultation le 16 juin 2015).

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES MINERAUX ARGILEUX

1.1 - La densité de charge spécifique : σ est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\sigma(\text{meq} / \text{m}^2) = \frac{\text{CEC}}{s} \quad (1)$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- a. Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique ; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique).
- b. Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur.

Plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement.

1.2 - La capacité d'échange cationique (CEC)

Mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales (I. Lefevbre et A. Lajudie). Ces propriétés pourraient être déterminées par l'essai au bleu de méthylène.

a. Les cations échangeables

Les substitutions isomorphes de Al^{3+} par Mg^{2+} à la surface des feuillets entraînent un excès de charge négative. Pour assurer l'électro-neutralité, ce déficit de charge est compensé par des cations Ca^{2+} ou Na^+ . Les montmorillonites compensées par des cations Ca^{2+} sont appelées des montmorillonites calciques. Lorsqu'elles sont compensées par des cations Na^+ , elles sont appelées des montmorillonites sodiques.

Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium Na^+ est plus faible que celle des cations de calcium Ca^{2+} , c'est pour cette raison que la

montmorillonite sodique aura un gonflement plus élevé, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets.

Tableau 49: Classification des minéraux phyllosilicates

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèces	Formules
1 : 1	Kaolinite	Kaolinites	Dickite	$Al_2 Si_2O_5(OH)_4$
			Nacrite	$Al_2 Si_2O_5(OH)_4$
			Kaolinite	$Al_2 Si_2O_5(OH)_4$
			Métahalloysite	$Al_2 Si_2O_5(OH)_4$
			Halloysite	$Al_2 Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$
		Serpentines	Antigorite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
2 : 1	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
		Talc	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
	Smectites	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(Al_{1,67}Mg_{0,33})O_{10}(OH)_2$
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$Mg_3Si_{3,67}Al_{0,33}O_{10}(OH)_2$
	Vermiculites	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(Al,Fe\dots)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(Mg,Fe\dots)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
	Micas	Micas dioctaédriques	Muscovite	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
		Micas trioctaédriques	Phlogopite	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
2 : 1 : 1	Chlorites	Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$Al_4(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
		Chlorites trioctaédriques	Espèces différentes	$(Mg,Fe\dots)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$

Tableau 50: Caractéristiques physico-chimiques de quelques minéraux argileux

	kaolinite	illite	smectite
Charge (meq/100g)	5 - 15	20 - 40	80 - 100
Surface spécifique ($m^2 \cdot g^{-1}$)	10 - 20	65 - 100	700 - 840
CEC (meq/100g)	3 - 15	10 - 40	80 - 150
Diamètre d'une particule (μm)	0,1 - 10	0,1 - 1	0,1
Épaisseur d'une particule (μm)	1 - 10	0,003 - 0,01	0,001
Masse volumique	2,60 - 2,68	2,60 - 3,00	2,35 - 2,70
Limite de liquidité (%)	30 - 75	60 - 90	100 - 1000
Limite de Plasticité (%)	20 - 40	25 - 60	50 - 100
Activité	0,01 - 0,4	0,25 - 0,9	0,57 - 7

1.3 - Les grandes familles des minéraux argileux

- **La kaolinite** est stable au contact de l'eau. L'**halloysite**, un composé minéral appartenant aussi au groupe du kaolinite de formule chimique : $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Il diffère de cette dernière par la présence d'une couche d'eau dans l'espace interfoliaire. La distance interfoliaire est alors de 1 nm (10 Å).
La CEC de l'halloysite est fonction de son degré d'hydratation et comprise entre 5 et 50 cmolc kg⁻¹.
- **La montmorillonite** n'est pas du tout stable au contact de l'eau. Les sols à forte teneur en montmorillonite sont susceptibles de gonflement et de retrait important.
- **L'illite** a un comportement intermédiaire (les latérites font partie de cette famille d'argile).

En effet, deux types de gonflement peuvent se produire au sein des matériaux argileux :

- a. Le gonflement intraparticulaire ou interfoliaire,
- b. Le gonflement interparticulaire.

Le changement de volume de certains sols argileux en fonction de leur teneur en eau pourrait créer des désordres dans les ouvrages géotechniques. D'autre comme les micas sont plus sensibles à l'altération.

ANNEXE 2 : ETATS DE CONSISTANCES DES SOLS

Par convention, Selon sa teneur en eau, un sol peut se présenter sous quatre états de consistances, allant de l'état solide vers l'état liquide. Ces états sont :

1. Etat solide sans retrait
2. Etat solide avec retrait
3. Etat plastique
4. Etat liquide

L'état de consistance varie en fonction de l'eau interstitielle entre les pores du sol et l'eau adsorbée enrobant les grains.

Dans le cas de l'état solide sans retrait, les grains de sol se touchent, l'eau interstitielle est inexistante et les tractions capillaires entre les grains sont importantes. La diminution de la teneur en eau ne provoque pas de retrait.

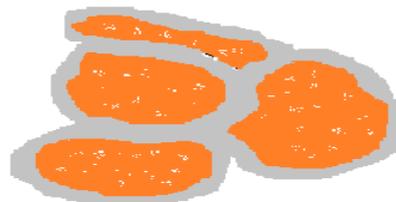


figure 40: Etat solide sans retrait

Dans le cas de l'état solide avec retrait où le sol prend l'allure d'un solide plastique, l'eau interstitielle existe, les tractions capillaires diminuent entre les grains et l'eau adsorbée augmente. Seulement une partie des grains de sol se touchent et la diminution de la teneur en eau provoque un retrait.

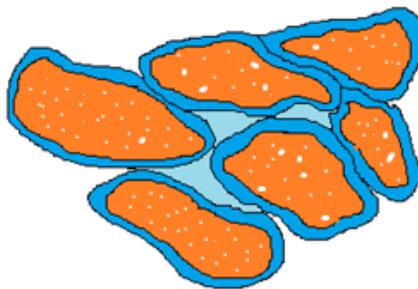


Figure 41: Etat solide avec retrait

Le sol est à l'état plastique si l'eau interstitielle est importante, les grains de sols ne se touchent que par l'intermédiaire de leur film d'eau adsorbée. La rigidité de ce dernier s'oppose seule aux mouvements des grains.

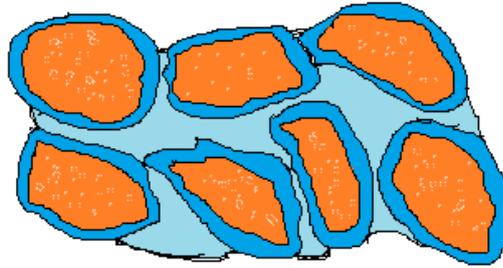


Figure 42: Etat plastique

Le sol est à l'état liquide si l'eau interstitielle devient très importante, il n'y a plus de contact, même par les films d'eau adsorbée entre les grains du sol qui roulent facilement les uns sur les autres.

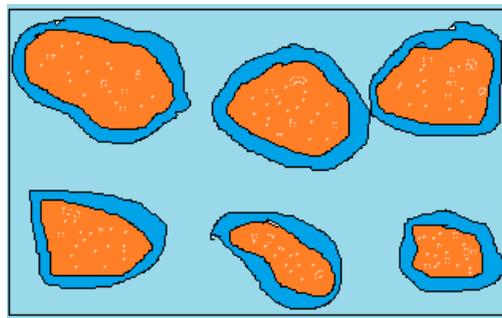


Figure 43: Etat liquide

L'essai relatif à cette consistance pour déterminer les limites de chaque état sont « les limites d'Atterberg » qui sont des paramètres géotechniques conventionnelles destinés à identifier un sol et son état au moyen de l'indice de consistance.

Tableau 51 : Etats de consistances du sol

Indice de consistance	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

$I_c = 0$ si $W_n = W_L$, matériaux à l'état liquide

$I_c = 1$ si $W_n = W_P$, matériaux à l'état solide

Ces états pourraient être représentés dans le graphique suivant :

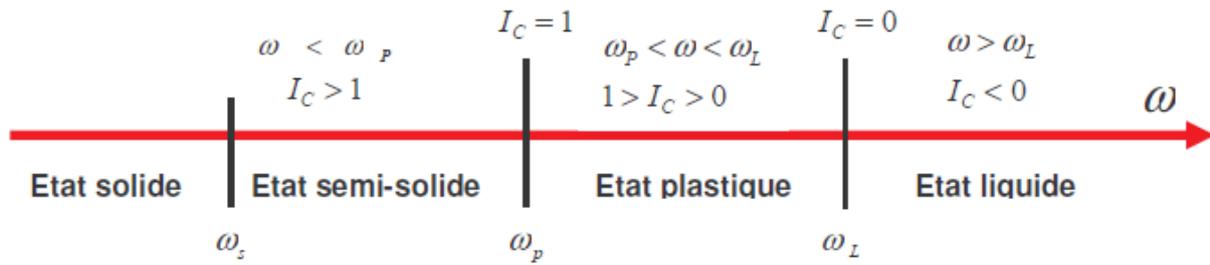


Figure 44: États de consistance d'un sol

Tableau 52: Echelle de consistance selon TERZAGHI

W	WL					Wp
		0.25	0.50	0.75		
I.C	0					1
	Liquide	Très molle	Molle	Mi- consistant	Consistant	Très consistant

La consistance est relative au degré d'adhérence entre les particules du sol et à la résistance offerte aux forces qui tendent à déformer ou à rompre l'agrégat.

Tableau 53: Consistance des sols cohérents selon leur résistance au cisaillement non drainé

Consistance	Résistance au cisaillement non-drainé c_u (kPa)
Très molle	<12
Molle	12-25
Ferme	25-50
Raide	50-100
Très raide	100-200
Dure	>200

Remarque

- Entre l'état solide avec retrait et la limite de plasticité : le sol se trouve dans la phase du comportement friable.
- De limite de plasticité jusqu'à la limite de liquidité : le sol se trouve dans la phase du comportement plastique

ANNEXE 3 : ESSAIS GEOTECHNIQUES

3.1 - Appareillage pour la détermination des limites d'Atterberg

Les matériels nécessaires pour préparer et pour déterminer des limites d'Atterberg sont :

- Un récipient d'au moins 2l.
- Un bac de décantation
- Un tamis à maille carrée de 400 μ m d'ouverture
- Un appareil de casagrande ou un cône de pénétration pour déterminer la WL
- Une étuve de dessiccation de 105°C ou 50°C
- Une balance de précision
- Des capsules ou boîte de pétri, spatules, truelle

Une plaque lisse en marbre ou équivalent pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol

3.2 - Préparation des échantillons pour essai Proctor

a. Prise d'échantillon

5 essais sur un échantillon sont nécessaires pour la réalisation de la courbe Proctor. Chaque essai utilise 3 kg ou 6 kg d'échantillon du sol. On prélèvera :

- Pour la moule Proctor : 5 x 3 kg = 15 kg
- Pour la moule CBR : 5 x 6 kg = 30 kg

Contrôle de l'échantillon pour la faisabilité de l'essai :

Si $D \geq 20$ mm, il faut tamiser à 20 mm le sol et peser le refus :

- Si le refus est $\leq 25\%$, l'essai doit être réalisé dans le moule CBR, mais intégrer le refus (échantillon écrêté à 20 mm)
- Si le refus est $> 25\%$, l'essai PROCTOR ne doit pas être réalisé (comptage hasardeux)

b. Préparation de l'éprouvette

Ecraser les mottes à la main ou au malaxeur, mais pas les éléments pierreux, et homogénéiser soigneusement le matériau (sa teneur en eau doit être homogène).

Sécher le matériau à l'air ou à l'étuve (3 à 5 heures à 60°C), pour faciliter le tamisage et pour débiter l'essai avec une teneur en eau inférieure à la teneur en eau optimale Proctor (l'essai est fait à teneur en eau croissante).

Commencer les essais à une teneur en eau W qui se situe environ à 4 ou 5% au-dessous de la teneur en eau optimale Proctor (W_{opt})

3.3 - Préparation de l'essai CBR

a. Le compactage

Le comptage du matériau soumis à l'essai CBR dépend de la valeur Optimum Proctor Modifié (OPM) obtenue lors de l'essai Proctor. L'échantillon sera donc, préparé à la teneur en eau OPM :

Pulvériser l'échantillon du sol en faisant disparaître les mottes sans détruire les squelettes des grains grossiers.

Enlever les grains supérieurs à 20 mm en les remplaçant par une même quantité d'éléments compris entre les tamis de 5 et 20 mm si nécessaire.

Humidifier le matériau à compacter à une teneur en eau égale à W_{opm}.

Après le compactage, on obtient une éprouvette.

b. L'immersion

Le but de cette opération est de déplacer le sol dans les plus mauvaises conditions hygrométriques qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique.

On immerge le moule contenant l'éprouvette dans un bac rempli d'eau jusqu'à la saturation complète du sol pendant 4 jours en générale. Il est à noter qu'il faut laisser un espace de 10 mm entre la base du moule et le fond du bac pour l'infiltration de l'eau dans les pores de la base.

Le gonflement pendant l'imbibition sera mesuré par un comparateur placé sur le moule CBR. Ce gonflement s'appelle gonflement absolu (G_a).

c. Le poinçonnement

Après cette durée d'imbibition, l'éprouvette va subir un poinçonnement sur la presse CBR en maintenant la vitesse de pénétration du piston à 1,27 mm/min. le mouvement de ce piston de poinçonnement se fait automatiquement ou en suivant le cadence de la machine.

En même temps, on effectue les mesures de la force exercée correspondants aux enfoncements de 1,25 mm – 2,0 mm – 2,5 mm – 5,0 mm – 7,0 mm et 10mm.

ANNEXE 4 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS

SOLS FINS

Classe A

Classe			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 de seuils retenus	Sous-classe		
D _{max} ≤ 60mm et tamisat à 80µm > 35 %	A sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I _p ≤ 12	A ₁	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w _c est proche de w _{opt} . 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.	$IPI \leq 3$ ou $w_i \geq 1,25 W_{opt}$ $3 < IPI \leq 8$ ou $1,10 W_{opt} \leq w_i < 1,25 W_{opt}$ $8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 W_{opt} \leq w_i < 1,10 W_{opt}$ $0,7 W_{opt} \leq w_i < 0,9 W_{opt}$ $w_i < 0,7 W_{opt}$	A ₁ h A ₁ h A ₁ m A ₁ s A ₁ is		
			A ₂	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 (s'il a 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.	$IPI \leq 2$ ou $Ic \leq 0,9$ ou $w_i \geq 1,3 W_{opt}$ $2 < IPI \leq 5$ ou $0,9 < Ic \leq 1,05$ ou $1,1 W_{opt} \leq w_i < 1,3 W_{opt}$ $5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < Ic \leq 1,2$ ou $0,9 W_{opt} \leq w_i < 1,1 W_{opt}$ $1,2 < Ic \leq 1,4$ ou $0,7 W_{opt} \leq w_i < 0,9 W_{opt}$	A ₂ h A ₂ h A ₂ m A ₂ s A ₂ is		
			A ₃	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	$IPI \leq 10$ ou $Ic \leq 0,8$ ou $w_i \geq 1,4 W_{opt}$ $1 < IPI \leq 3$ ou $0,8 < Ic \leq 1$ ou $1,2 W_{opt} \leq w_i < 1,4 W_{opt}$ $3 < IPI \leq 10$ ou $1 < Ic \leq 1,15$ ou $0,9 W_{opt} \leq w_i < 1,2 W_{opt}$ $1,15 < Ic \leq 1,3$ ou $0,7 W_{opt} \leq w_i < 0,9 W_{opt}$	A ₃ h A ₃ h A ₃ m A ₃ s A ₃ is		
			A ₄	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.	$Ic > 1,4$ ou $w_i < 0,7 W_{opt}$ $IPI \leq 10$ ou $Ic \leq 0,8$ ou $w_i \geq 1,4 W_{opt}$	A ₄ h A ₄ h A ₄ m A ₄ s		

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

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	iv
LISTE DES CARTES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES PHOTOS.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ANNEXES.....	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I- ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	
CHAPITRE I- GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE.....	2
I.1 – Monographie [1] [2]	2
I.1.1 – Localisation de la zone d'étude	2
I.1.2 – Climat.....	4
I.1.2.1 - Température	4
I.1.2.2 - Pluviométrie	4
I.1.3 – Végétation.....	5
I.1.4 - Population et activités économiques.....	5
I.1.5- Géomorphologie	6
I.1.6- Hydrographie	7
I.1.7- Géologie	7
I.1.8- Pédologie.....	9
I.2 - Contexte général de la route en terre étudiée [1] [2].....	12
I.2.1 - Les infrastructures routières de la région SAVA	12
I.2.2 - Historique de la route en terre étudiée.....	12
I.3. les communes concernées.....	14
I.4. Problématiques de la route en terre étudiées et gestion de risque et de catastrophe	15
CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES SOLS	18
II.1 - Définition et formation des sols	18
II. 2 - Les éléments constitutifs [3] [4].....	18

II.2.1- Modèles élémentaires d'un sol.....	18
II. 2.2 - Les éléments constitutifs	18
II. 2.3 - Les grandes familles de sol [3] [5] [6].....	19
II. 3 - Propriétés des sols	20
II.3.1 – Caractéristiques chimiques des sols	20
II.3.1.1 - Les oxydes et les oxy-hydroxydes	20
II.3.1.2 -Les nitrates	21
II.3.1.3 - Les phosphates	22
II.3.1.4 - Les chlorures	22
II.3.1.5 - Les sulfates et les sulfures	22
II.3.1.6 -La matière organique	23
II.3.1.7 -Le Ph	23
II.3.2–Propriétés minéralogiques des sols [3] [4] [5] [8] [9].....	24
II.3.2.1– Les tectosilicates.....	25
II.3.2.2– Les minéraux argileux : les phyllosilicates [4] [19]	25
II.3.3 – Les propriétés géotechniques des sols	27
II.3.3.1 - La granularité.....	27
II.3.3.2 - L'argilosité.....	28
II.3.3.3 - Caractéristiques des sols à partir de l'équivalent de sable	29
II.3.3.4 - La teneur en eau du sol	29
II.3.3.5 - Caractéristique au compactage [6] [15]	29
II.3.3.6 - La portance du sol	30
II.4 – Classification des sols	31
CHAPITRE III. GENERALITES SUR LES TRAITEMENTS DES SOLS.....	34
III.1 – Les techniques et produits de traitement ou l'amélioration des sols	34
III.2 - Les principales techniques d'amélioration ou de stabilisation des sols	34
III.3 - les produits courants pour le traitement des sols	35
III.3.1 - Le traitement des sols à la chaux [16] [15] [14] [4] [8]	36
III.3.1.1 - Les différents types de chaux	36
III.3.1.2 - Caractérisation de la chaux.....	36
III.3.1.3 - Spécifications de la chaux utilisée au traitement des sols [14].....	37

III.3.1.4 - Principe d'action de la chaux sur le sol	38
III.3.2 - Le traitement des sols aux liants hydrauliques.....	39
III.3.2.1 - Rôles des ciments.....	39
III.3.2.2 - Les constituants du ciment.....	39
III.3.2.3 - Les différents types de ciments.....	40
III.3.2.4 - Caractérisation des liants hydrauliques.....	40
III.3.2.5 - Spécification des ciments utilisés au traitement des sols	41
III.3.2.6 - Principe d'action des ciments sur le sol.....	41
III.3.2.7 - Liant hydraulique spécifique.....	42
III.3.3 – Conformité de traitement.....	43

PARTIE II- ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV- ETUDES PRELIMINAIRES 45

IV.1 - Travaux de terrain.....	45
IV.1.1 - Choix de la zone d'étude	45
IV.1.1.1 - Reconnaissance de terrain	45
IV.1.1.2 - Identification des problèmes	45
IV.1.2 – Echantillonnage	45
IV.1.3 – Cartographie de la zone d'étude.....	50
IV.1.4 – les matériels utilisés.....	51
IV.1.5 – Transport	51
IV.2 - Travaux de laboratoire	51

CHAPITRE V- METHODES DE CARACTERISATION DES SOLS..... 53

V.1 - Détermination des propriétés chimiques [20].....	53
V.1.1 - La fusion alcaline et dosage de la silice.....	53
V.1.2 - Dosage des hydroxydes	53
V.1.3 - Dosage de Fe_2O_3	53
V.1.4 - Dosage de TiO_2	54
V.1.5 - Dosage de Al_2O_3	54
V.1.6 - Dosage de CaO	54
V.1.7 - Dosage de MgO	54
V.1.8 - La mesure du pH [4]	54

V.1.9 - La perte au feu	54
V.2 - Détermination des propriétés minéralogiques.....	55
V.3 - Détermination des propriétés géotechniques.....	55
V.3.1 - Analyses granulométriques [22]	55
V.3.1.1 - But de l'essai	55
V.3.2 - Les limites d'Atterberg [23]	57
V.3.2.1 - Principe de l'essai	57
V.3.3 - Valeur de bleu d'un sol [24]	58
V.3.3.1 - But de l'essai	58
V.3.3.2 - Principes de l'essai.....	58
V.3.4 - Masse volumique des particules solides [25].....	59
V.3.4.1 - Principe de l'essai	59
V.3.5 - Essai de Gonflement libre	60
V.3.6 - La teneur en eau du sol [26].....	60
V.3.7 - Essais Proctor normal et modifié [27]	61
V.3.7.1 - But de l'essai	61
V.3.7.2 - Principe de l'essai	61
V.3.7.3 - Principe de la répartition des coups de dame sur une couche	62
V.3.8 - Essais CBR [28]	62
V.3.8.1 - But de l'essai.....	62
V.3.8.2 - Principe et méthodes.....	63
V.3.9 - Essai d'équivalent de sable [29]	64
CHAPITRE VI. METHODOLOGIE DE TRAITEMENTS DU SOL	66
VI.1 – Etude des propriétés géotechniques des sols traités ou améliorés	66
VI.1.1 – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement [30].....	66
VI.1.2 – Confection et conservation des éprouvettes [30] [31] [32]	66
VI.1.3 – Le gonflement volumique [30]	68
VI.1.4 – Détermination de la résistance en compression diamétrale (R_{tb}) ou résistances à la traction indirecte (R_{it}) par fendage – Essai brésilien. [30] [31] [32]	69
VI.1.5 – Résistances et module d'élasticité en traction indirecte	70

CHAPITRE VII- CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES	72
VII.1 - Caractéristiques chimiques.....	72
VII.1.1 - Interprétations des résultats chimiques.....	72
VII.1.1.1 - Echantillon ES1	72
VII.1.1.2 - Echantillon ES2	73
VII.1.1.3 - Echantillon ES3.....	73
VII.2 - Caractéristiques minéralogiques.....	75
VII.2.1 – Résultats de la microscopie optique	75
VII.2.1.1 - Echantillon ES1	75
VII.2.1.2 - Echantillon ES2	77
VII.2.1.3 - Echantillon ES3.....	78
VII.2.2 – Détermination de quelques minéraux argileux par la méthode de Casagrande	81
VII.3 - Caractéristiques géotechniques.....	82
VII.3.1 - Granularité	82
VII.3.1.1 - Courbe d'analyse granulométrique.....	83
VII.3.1.2 - Classification selon la granulométrie	84
VII.3.2 - L'argilosité	85
VII.3.2.1 - Echantillon ES1	86
VII.3.2.2 - Echantillon ES2	87
VII.3.2.2 - Echantillon ES3.....	87
VII.3.3 - Gonflement libre	88
VII.3.4 - La masse volumique des particules solides.....	88
VII.3.5 - L'équivalent de sable	88
VII.3.6 – Les Caractéristiques de compactage sols étudiés.....	89
VII.3.6.1 - Courbe Proctor ES1	89
VII.3.6.2 - Courbe Proctor ES2	90
VII.3.6.3 - Courbe Proctor ES3	90
VII.3.7 – La portance des sols non traités	91
VII.3.7.1 - Interprétations de résultats des essais CBR.....	92
VII.4 - Classification GTR.....	93
VII.5 - Récapitulation des résultats.....	94

PARTIE III- ESSAI D'AMELIORATION DES SOLS ETUDIES

CHAPITRE VIII- CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DE TRATEMENTS

VIII.1 - Caractéristiques des produits de traitements chimiques.....	97
--	----

VIII.1.1 – Chaux	97
VIII.1.2 – Ciment CEMI 42,5	98
VIII.1.2.1 - Caractéristiques chimiques	98
VIII.1.2.2 -Caractéristiques physiques	98
VIII.2 - Caractéristiques des matériaux pour lithostabilisation	98
VIII.2.1 – Granularité des granulats pour la lithostabilisation	99
VIII.2.2 – Masse volumique réelle et coefficient d'absorption.....	101
CHAPITRE IX- ESSAIS SUR LE SITE 1 - ECHANTILLON ES1	102
IX.1 - Traitement chimique	102
IX.1.1 - Identification géotechnique des matériaux traités	102
IX.1.2 - Aptitude aux traitements.....	103
IX.1.2.1 - Interprétation des résultats	103
IX.2 - Traitement mécanique : Lithostabilisation.....	107
IX.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges	108
IX.2.2 - Interprétations des résultats	109
CHAPITRE X- ESSAIS SUR LE SITE 2 - ECHANTILLON ES2.....	111
X.1 - Traitement chimique	111
X.1.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges	111
X.1.2 - Aptitude aux traitements.....	111
X.1.3 - Interprétation des résultats	112
X.1.3.1 - Traitement au ciment.....	112
X.1.3.2 - Traitement à la chaux.....	112
X.1.3.3 -Traitement mixte chaux-ciment	113
X.2 -Traitement mécanique : Lithostabilisation.....	116
X.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges	116
X.2.2 - Interprétations des résultats	117
CHAPITRE XI - ESSAIS SUR LE SITE 3 - ECHANTILLON ES3.....	119
XI.1 - Traitement chimique	119
XI.1.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges	119
XI.1.2 - Aptitude aux traitements.....	119

XI.1.3 - Interprétation des résultats	120
XI.1.3.1 - Traitement au ciment.....	120
XI.1.3.2 - Traitement à la chaux.....	120
XI.1.3.3 - Traitement mixte Chaux-ciment.....	120
XI.2 - Traitement mécanique : Lithostabilisation.....	124
XI.2.1 - Caractéristiques géotechniques des mélanges	124
XI.2.2 - Interprétations des résultats	125
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE.....	128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	130
LISTE DES ANNEXES	a

Auteur : DASY Kellyo
Nombre de pages : 131
Nombre de figures : 44
Nombre de tableaux : 53

TITRE

« CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES, MINERALOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DES SOLS EN VUE DE L'AMELIORATION DE LA DURABILITE DES ROUTES EN TERRE : CAS DE LA COMMUNE RURALE D'AMPOHIBE - DISTRICT D'ANTALAHA - REGION SAVA »

RESUME

Les travaux sur terrain et les caractérisations physico-chimiques, minéralogiques et géotechniques en laboratoire de trois échantillons des sols prélevés sur trois sites différents se trouvant sur la même route dans la commune rurale d'Amphibe, fokontany de Mahatsara à Ambodipont ont permis de détecter les mauvais états de la route en terre étudiée en cas de pluie et en saison cyclonique.

Face à ce problème, les méthodes d'amélioration par le traitement chimique ou par la lithostabilisation ont été adoptés afin d'adapter ces sols aux différentes structures d'une chaussée. Le premier traitement est très positif surtout au niveau du sol ES2 avec 4% du ciment et 3,5% de chaux ; ensuite au niveau du sol ES3 avec 4% de chaque type de liant. Le sol ES1 pourrait être amélioré avec 6% de chaux, mais seulement pour la couche de fondation. Face aux pourcentages très élevés des apports, le second traitement semble inadéquat aux trois échantillons du sol. On devrait donc, dans ce cas, adopter la solution des matériaux d'emprunts ou combiner les deux techniques de traitements.

Ces techniques de traitements sont écologiques, permettent de minimiser le transport, valorisent les matériaux locaux, et impliquent une stabilisation efficace des sols avant la mise en place des couches superficielles.

Mots clés : caractérisations, problème, amélioration, échantillon, traitement chimique, lithostabilisation, structure de la chaussée, efficace.

ABSTRACT

The fieldworks and the physicochemical, mineralogical and geotechnical characterizations in laboratory of three soil samples taken from three different sites in the rural commune of Amphibe, fokontany Mahatsara Ambodipont have detected the bad states of studied dirt road in the rain and cyclonic season.

To resolve this problem, methods of improvements by chemical treatment or by lithostabilisation were adopted in order to adapt to the different pavement structures. The first treatment is very positive particularly for soils sample ES2 with 4% cement and 3,5% of lime; then at the sample of soil ES3 is 4% each one. The soil ES1 could be improved with 6% of lime, it is only for the foundation layer. Faced to very high percentages of material contributions, the second treatment seems inadequate to the three soil samples. Therefore, we should adopt the solution of borrowing materials or to combine these two technicals of treatments.

These processing technicals are environmentally friendly, can minimize transportation, promote the local materials, and imply efficient soil stabilization before the implementation of the upper layers.

Keywords: characterizations, problem, improvement, sample, chemical processing, lithostabilisation, pavement structure, efficient.

Rapporteur: Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely

Adresse de l'auteur : Email : dasykellyo@yahoo.fr Tel : 032 61 102 99 / 034 29 224 27