

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE
Union - Discipline - Travail
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Institut National Polytechnique
Félix HOUPHOUËT - BOIGNY



Ecole Doctorale Polytechnique

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée pour l'obtention du titre de
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE Félix HOUPHOUËT - BOIGNY

Spécialité : GENIE CIVIL
Option : Géotechnique routière

Par :

KOUASSI Kouakou Pierre

**ETUDE DES SABLES ARGILEUX DU SUD DE LA CÔTE
D'IVOIRE UTILISES EN TECHNIQUES ROUTIERES :
INFLUENCE DES TRAITEMENTS AUX MELANGES
CHAUX ET CIMENT**

Soutenue publiquement le 27 /01/2021 devant le jury composé de :

M. TOURE Kidjégbo Augustin	Professeur Titulaire INP-HB (Côte d'Ivoire)	Président du Jury
M. MONDE Sylvain	Professeur Titulaire UFHB (Côte d'Ivoire)	Rapporteur
Mme. KIKI Tankpinou Sèdjro Yvette	Maître de Conférences UNSTIM (Bénin)	Rapporteur
M. COULIBALY Yacouba	Professeur Titulaire UFHB (Côte d'Ivoire)	Examineur
M. KONIN Athanas	Maître de Conférences INP-HB (Côte d'Ivoire)	Directeur de thèse

DEDICACE

A tous ceux qui espèrent en mon avenir lumineux et prometteur,

A la mémoire de mes parents défunts : Jacob KONAN, Rachelle N'GORAN,
Bernard N'DEKPLOMAN et Jeannette AYA épouse SIKA.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée à l'Institut National Polytechnique Félix HOUPHOUËT - BOIGNY (INP-HB) de Yamoussoukro et à l'Université Félix HOUPHOUËT - BOIGNY (UFHB) d'Abidjan au sein de l'Equipe de Recherche en Géomatériaux.

Au moment de présenter les résultats de cette étude, je voudrais exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont aidé à les rendre possibles, tant par leurs apports scientifiques et techniques, leurs appuis financiers, que par leurs encouragements.

Je voudrais saisir l'occasion pour saluer et remercier tout le personnel de l'Ecole Doctorale Polytechnique (EDP) de l'INP-HB Yamoussoukro avec à sa tête Monsieur **YAO Kouassi Benjamin**, Professeur Titulaire de l'Institut National Polytechnique de Yamoussoukro qui m'a reçu dans cette prestigieuse école de formation.

Je remercie chaleureusement, pour leur disponibilité, les membres du jury composé de : Monsieur **TOURE Kidjébo Augustin**, Professeur Titulaire de l'Institut National Polytechnique de Yamoussoukro, Président du jury de cette thèse, Monsieur **KONIN Athanas**, Maître de Conférences de l'Institut National Polytechnique de Yamoussoukro, Directeur de cette thèse, qui a su donner des orientations de recherche, aux fins de mener à bout ce travail, Madame **KIKI Tankpinou Sèdjro Yvette**, Maître de Conférences/CAMES de l'Université Nationale des Sciences, Technologie, Ingénierie et Mathématique (UNSTIM) du BENIN, Rapporteur de cette thèse, Monsieur **MONDE Sylvain**, Professeur Titulaire/CAMES de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, Rapporteur de cette même thèse et Monsieur **COULIBALY Yacouba**, Professeur Titulaire de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, Examineur de cette thèse. Mes remerciements vont également, à l'endroit de Professeur **EMERUWA Edjikémé**, Responsable de l'Equipe de Recherche en Géomatériaux de l'Université Félix HOUPHOUËT – BOIGNY d'Abidjan qui a facilité mon accès au personnel ainsi qu'au matériel de cette Equipe de Recherche. Je n'oublie pas, dans cette Equipe de Recherche, Professeur **KOUAKOU Conand Honoré**, qui m'a reçu avec bienveillance, et avec qui, j'ai travaillé. Il s'est rendu disponible, à tous égards, quand il a été sollicité pour aider à réaliser certains essais de laboratoire de cette étude, je voudrais lui témoigner ma gratitude et toute ma reconnaissance. Je salue tous les autres enseignants-chercheurs que j'ai côtoyés et qui m'ont conseillé dans cette Equipe.

Pendant son déroulement, des évaluations techniques ont émaillé cette étude en vue d'apprécier le contenu scientifique et l'avancement du travail. Au cours de ces évaluations, les

questions qui m'ont été posées ; que ce soient lors des différents comités de thèse, lors des différentes communications aux doctoriales ou lors des grandes rencontres telles les Journées Africaines de la Géotechnique (JAG) m'amènent, à dire, aussi, merci aux personnes ressources suivantes, qui sont : Docteur **KOUASSI Paulin Maxime Yao**, Conseiller Technique au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) d'Abidjan dont les orientations et les suggestions m'ont permis d'étoffer et d'enrichir davantage mon travail, Docteur **BOHI Zondjé Bernardin**, Enseignant-chercheur à l'INP-HB, qui n'a jamais manqué de m'encourager dans ce travail, Docteur **PANGO-TANO Blanche** pour ses encouragements aux JAG et Professeur **Kalile CISSE** de l'Université CHEICKH ANTA DIOP (UCAD) du Sénégal, dont la pertinence des remarques, lors de ma communication aux Journées Africaines de la Géotechnique (JAG) 2018 à Abidjan République de Côte d'Ivoire, m'a permis de revoir mes notes sur les normes dans le dimensionnement des chaussées en Afrique. Je salue et je remercie Monsieur **YAPO Calice**, Directeur Général Adjoint de l'Agence de Gestion des Routes et Monsieur **OFFI N'guessan Michel Armand**, Directeur Général des Finances du District Autonome d'Abidjan, pour les encouragements et les conseils donnés, dès l'entame de cette thèse. Mes remerciements vont également à l'endroit de : Monsieur **KOUASSI Kouassi Jean Claude**, Directeur Général du LBTP qui a donné son accord écrit pour que j'aie accès au matériel et au personnel du LBTP et Madame **GUE-KLOKOUÉ Flore**, responsable de la division recherche appliquée du LBTP pour ses conseils et sa disponibilité. Je remercie le personnel du Laboratoire minéralogie et chimie de PETROCI à travers Monsieur **TAHE Thierry** de la division Minéralogie et Madame **ATSE Oura E. Laure** de la division chimie, le personnel du Laboratoire chimie de la SODEMI et le Laboratoire de l'entreprise LECAT pour leur contribution aux différents essais qui ont permis ce travail. Je remercie Monsieur **YAO Kouakou Germain**, Directeur Général des Infrastructures Routières (DGIR) qui a bien accepté de soutenir ce travail de recherche.

Je n'oublie pas mes amis : Docteur **ATTO Yapi Désiré** de l'Université de Man, Docteur **AGRE Djomo** de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE de Daloa et, avec eux, Docteur **ANO François d'Assise**, Madame **COULIBALY Yoh** épouse **KOUAME**, Messieurs **KOUADIO Yao Peter** et **GREHOA Abalé Martial** tous, de l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, qui m'ont témoigné une réelle sympathie le long de cette étude.

A toutes mes connaissances qui, de près ou de loin, ont contribué à l'avancement de ce travail, à mon épouse **Ursule N'dah KONAN** pour sa bonne compréhension. A mes enfants, à mes frères et sœurs qui m'ont aidé et soutenu, je dis, sincèrement merci.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
RESUME.....	xvi
ABSTRACTS.....	xvii
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
CHAPITRE I : GENERALITES	5
I.1. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA CONSTRUCTION ROUTIERE	5
I.2. DEFINITION DE LA ROUTE ET DE LA CHAUSSEE.....	8
I.2.1. CHAUSSEE.....	8
I.2.2. PLATE-FORME	10
I.2.3. COUCHE DE FORME	10
I.2.4. SOUS COUCHES.....	10
I.2.5. COUCHE DE FONDATION	11
I.2.6. COUCHE DE BASE ET COUCHE DE SURFACE.....	11
I.3. PARAMETRES DE CONCEPTION ROUTIERE.....	12
I.4. MISE EN ŒUVRE	15
I.5. GENERALITES SUR LES CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES ET PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SABLES ET DES ARGILES	19
I.5.1. DEFINITION ET FORMATION DES SABLES.....	19
I.5.2. DEFINITION ET FORMATION DES ARGILES.....	21
CHAPITRE II : MELANGES LIANTS HYDRAULIQUES (CHAUX - CIMENT) – SOLS ARGILEUX : REACTIONS CHIMIQUES, PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES	30
II.1. RAPPELS	30
II.2. CARACTERISTIQUES DE LA CHAUX ET DU CIMENT	30
II.3. REACTIONS ARGILE-CHAUX.....	31
II.3.1. ECHANGE CATIONIQUE	32
II.3.2. FLOCCULATION-AGGLOMERATION.....	32
II.3.3. CARBONATATION	33
II.3.4. REACTION POZZOLANIQUE	33

II.4. REACTIONS PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT	35
II.5. INFLUENCES DES LIANTS HYDRAULIQUES SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANQUES DES SOLS REMANIES.....	35
II.5.1. INFLUENCE DES LIANTS SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DU SOL	36
II.5.1.1. Granulométrie	36
II.5.1.2. Consistance du sol	36
II.5.1.3. Teneur en eau optimale et densité sèche maximale.....	37
II.5.2. INFLUENCE DES LIANTS SUR LES PROPRIETES MECANQUES DU SOL ..	37
CHAPITRE III : NORMES DE RECONNAISSANCE ET D’ESSAI GEOTECHNIQUE	37
III.1. ESSAI DE PRELEVEMENT ET D’IDENTIFICATION DES SOLS	38
III.2. ESSAI D’APTITUDE ET DE MELANGES DES TRAITEMENTS DES SOLS	38
III.3. ESSAI MECANIQUE DES SOLS TRAITES	39
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES.....	41
CHAPITRE IV : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES	
D’ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES	41
IV.1. MATIERE PREMIERE	41
IV.2. MATERIEL D’ACQUISITION ET D’EXPLOITATION DE DONNEES	43
IV.3. METHODES EXPERIMENTALES.....	46
IV.3.1. ESSAI D’IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE	46
IV.3.1.1. Analyse granulométrique et sédimentométrie de la matière première.....	46
IV.3.1.2. Limites d’Atterberg.....	49
IV.3.1.3. Essai au bleu de méthylène	50
IV.3.1.4. Diagramme de plasticité.....	50
IV.3.1.5. Identification et appellation des sols.....	51
IV.3.1.6. Essai Proctor modifié et essai de portance CBR à 95% de l’OPM modifié à quatre jours d’immersion	52
IV.3.2. METHODE DE CARACTERISATION MECANQUES DE LA MATIERE PREMIERE	54
IV.3.3. METHODE DE CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DE LA MATIERE PREMIERE.....	57
IV.3.3.1. Méthode de caractérisation chimique	57
IV.3.3.2. Méthode de caractérisation minéralogique	59
IV.3.3.2.1. Préparation des échantillons.....	60

IV.3.3.2.1.1. Décarbonatation	60
IV.3.3.2.1.2. Elimination de la matière organique	60
VI.3.3.2.1.3. Décantation et le lavage des échantillons	60
IV.3.3.2.1.4. Prélèvement de la fraction argileuse	60
IV.3.3.2.2. Confection des lames orientées.....	61
IV.4. METHODE DE MISE EN ŒUVRE DES MELANGES CHAUX ET CIMENT A LA MATIERE PREMIERE	62
IV.5. METHODE DE CONFECTION DES EPROUVETTES	63
IV.6. METHODE DE CARACTERISATION MECANIQUES DE L'EPROUVETTE APRES ETUDE DES MELANGES SOL ET LES LIANTS HYDRAULIQUES	64
IV.6.1. RESISTANCE A LA TRACTION D'UN MATERIAU	64
IV.6.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION D'UN MATERIAU	66
IV.6.3. MEHODE DE DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUE A 360 JOURS DE CURE DANS L'EAU DES SOLS TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT	67
IV.7. DIMENSIONNEMENT D'UNE ASSISE DE CHAUSSEE A L'AIDE DE LA METHODE CEBTP ET DU LOGICIEL ALIZE (LCPC).....	68
IV.7.1. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT	68
IV.7.2. METHODE DE DIMENSIONNEMENT	68
IV.7.3. APPLICATION DU DIMENSIONNEMENT.....	72
TROISIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSSION	76
CHAPITRE V : CARACTERISATION DES SOLS REMANIES DE GRAND-LAHOU, SONGON, SAMO ET BINGERVILLE	76
V.1. CARACTERISATIONS PHYSIQUES DES SOLS DE GRAND-LAHOU, SONGON SAMO ET BINGERVILLE	76
V.1.1. GRANULOMETRIES	76
V.1.2. TENEUR EN EAU ET ETAT DE PLASTICITE DES SOLS REMANIES	79
V.1.3. CAPACITE D'ABSORPTION IONIQUE DES SOLS REMANIES.....	82
V.1.4. CARACTERISTIQUE DE COMPACTAGE DES SOLS REMANIES	82
V.1.5. PORTANCE DES SOLS REMANIES	83
V.1.6. COEFFICIENT DE GONFLEMENT VOLUMIQUE ET APTITUDE AU TRAITEMENT DES SABLES ARGILEUX.....	85
V.2. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SABLES ARGILEUX DE SONGON, BINGERVILLE, SAMO ET GRAND-LAHOU A L'ETAT NATUREL	88
V.2.1. TENEUR EN OXYDE	88
V.2.2. TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE	90

V.3. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES SABLES ARGILEUX DE SONGON, GRAND- LAHOU, BINGERVILLE ET SAMO.....	91
V.3.1. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE BINGERVILLE.....	91
V.3.2. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE SONGON	93
V.3.3. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE SAMO.....	95
V.3.4. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE GRAND-LAHOU.....	97
V.4. DISCUSSION	99
CHAPITRE VI : TRAITEMENT DES SABLES ARGILEUX AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT	102
VI.1. INFLUENCE DES TRAITEMENTS AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT SUR L'ESSAI PROCTOR MODIFIE DES DIFFERENTS SABLES ARGILEUX	102
VI.2. INFLUENCE DU TRAITEMENT DU MELANGE CHAUX ET CIMENT SUR LE CBR OU L'INDICE PORTANT IMMEDIAT (IPI) DES SABLES ARGILEUX ETUDIES	109
VI.3. INFLUENCE DU TRAITEMENT AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT SUR L'INDICE PORTANT OU CBR A 95% A 4 JOURS D'IMMERSION DANS L'EAU DES SABLES ARGILEUX	110
VI.4. DISCUSSION SUR L'INFLUENCE DU MELANGE DE LA CHAUX ET CIMENT SUR LES PROPRIETES MECANQUES DES SABLES ARGILEUX.....	115
CHAPITRE VII : CARATERISATIONS DES PROPRIETES MECANQUES DES SABLES ARGILEUX TRAITES AU MELANGE CHAUX ET CIMENT.....	117
VII.1. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A COURT, MOYEN ET LONG TERME.....	118
VII.1.1. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 28 JOURS DE CURE DANS L'EAU	118
VII.1.1.1. Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment	118
VII.1.1.2. Evolution de la résistance à la traction à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment.....	120
VII.1.2. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 90 JOURS DE CURE DANS L'EAU	121
VII.1.2.1. Evolution de la résistance à la traction à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment.....	121

VII.1.2.2. Evolution de la résistance à la compression à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment	122
VII.1.3. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 360 JOURS DE CURE DANS L'EAU	125
VII.1.3.1. Evolution de la résistance à la traction à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment	125
VII.1.3.2. Evolution de la résistance à la compression à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment	126
VII.2. EVALUATION DES MODULES DE YOUNG DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT	129
VII.3. EVALUATION DES COEFFICIENTS DE POISSONS DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT.....	130
VII.4. DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRESPONDANCE R_{T90}/R_{T360} ET E_{T90}/E_{T360} DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT	133
VII.5. APPLICATION DES RESULTATS AU DIMENSIONNEMENT DE STRUCTURES DE CHAUSSEE	134
VII.5.1. DETERMINATION DES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ADMISSIBLES A L'AIDE DU CODE ALIZE	135
VII.5.2. COMPARAISON DES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ADMISSIBLES AUX VALEURS DU CODE ALIZE	136
VII.5.2.1. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour Grand-Lahou	137
VII.5.2.2. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Songon	138
VII.5.2.3. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Samo	139
VII.5.2.4. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Bingerville	141
VII.6. DISCUSSION.....	143
CONCLUSION GENERALE.	149
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	152
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	154
ANNEXES	xviii

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR : Agence Française de Normalisation.

AIPEA : Association Internationale Pour l'Etude des Argiles.

CBR : Californian Bearing Ratio.

BTP : Bâtiment et Travaux Publics.

CAM : Coefficient d'Agressivité Moyen.

CEBTP : Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics.

CEC : Capacité d'Echange Cationique.

CLK : Ciment Laitier au clinKer.

CMS : Clay Mineral Society.

COT : Carbone Organique Total.

CPJ : Ciment Portland Joint (Ciment Portland avec ajout).

CPT : Cahier de Prescription Technique.

CIMARG : Bloc Ciment Argile.

CRA Terre : Centre de Recherche Appliquée à la Terre.

CSH : Silicate de Calcium Hydraté.

DSM : Densité Sèche Maximum.

DRX ou XRD : Diffraction aux Rayons X ou X Ray Diffraction.

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique.

FRX ou XRF : Fluorescence de Rayons X ou X Ray Fluorescence.

GTR : Guide des Terrassements Routiers.

GL1, GL2, GL3 : Graveleux Latéritique de type 1, 2 et 3

HRB : High Research Board.

IQE : Indice de Qualité Elastique.

LBTP : Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics.

LPC : Laboratoire des Ponts et Chaussées

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

MEB : Microscope Electronique à Balayage

MO : Matière Organique.

NE : Nombre d'Essieux Standard.

pH : Potentiel Hydrogène.

SODEMI : Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire.

TEO : Teneur en Eau Optimale

UFR STRM : Unité Formation et Recherche Sciences de la Terre et Ressources Minières.

USCS : Unified Sol Classification System.

VBS : Valeur au Bleu des Sols.

VRS : Voirie du Réseau Structurante.

VRNS : Voirie du Réseau non Structurante.

SA : Sand Asphalte.

SAA : Spectrométrie d'Absorption Atomique.

SACC : Sable Argileux traité à la Chaux Ciment.

SC : Sol Ciment.

SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagement (ex. Service d'Etudes Techniques, des Routes et Autoroutes).

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Routes à base de sol latéritique dégradées sur la côte du Sud de la Côte d'Ivoire	2
Figure 2 : Sols argileux-gonflants dans la zone de l'autoroute Dakar-Thiès au Sénégal YOUM, 2020	2
Figure 3 : Structure générale d'une chaussée (MENGUE, et <i>al.</i> , 2015)	9
Figure 4 : Schéma illustrant les agressivités de la chaussée par un véhicule léger et un poids lourd (in CIM-BETON, 2019)	13
Figure 5 : Carte de répartition géotechnique des sols en fonction des régions (LBTP, 1997)	18
Figure 6 : Classifications granulométriques des sables (FOUCAULT et <i>al.</i> , 1995).....	20
Figure 7 : Altération des minéraux et processus de formation des argiles (GRIM,1953).....	22
Figure 8 : Grandes familles des argiles (GRIM, 1953)	24
Figure 9 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons de sols remaniés.....	42
Figure 10 : Matériel de prélèvement des échantillons de matière première (GREHOA, 2016)	44
Figure 11 : Matériel de laboratoire (GREHOA, 2016)	45
Figure 12 : Courbe granulométrique des sols (GUETTOUCHE, 2016)	48
Figure 13 : Diagramme de plasticité (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997).....	51
Figure 14 : Classification triangulaire textural de Casagrande	52
Figure 15 : Exemple de courbe Proctor (TANKPINOU, 2016).....	53
Figure 16 : Dispositif œdométrique permettant de réaliser l'essai œdométrique et éprouvette de sol après test de compressibilité	54
Figure 17 : Méthode de détermination graphique de la contrainte de pré-consolidation σ'_p par Casagrande. (SOULEY, 2016).....	55
Figure 18 : Etapes de la mise en œuvre des éprouvettes pour compactage (GREHOA, 2016).....	64
Figure 19 : Essai de résistance à la traction (NF P98-232-2, 1992)	66
Figure 20 : Essai de résistance à la compression (NF P98-232-1, 1992).....	67
Figure 21 : Sollicitations dans la chaussée (MENGUE et <i>al.</i> , 2015)	68
Figure 22 : Massif multicouche et charge de référence (MENGUE et <i>al.</i> , 2015).....	70
Figure 23 : Moteur de calcul ALIZE (LCPC, 1994)	73
Figure 24 : Courbes granulométriques des sols remaniés à Bingerville, Songon, Grand-Lahou et Samo	76
Figure 25 : Résultat de l'identification des différents sols remaniés de l'étude dans le triangle textural de Casagrande (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997).....	79

Figure 26 : Position des différents sols remaniés sur le diagramme de plasticité de Casagrande (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997)	81
Figure 27 : Résultats des Proctor modifiés des différents sols remaniés de l'étude	82
Figure 28 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des différents sols remaniés de l'étude.....	84
Figure 29 : Courbes de compressibilité des sables argileux de Bingerville, Samo, Grand-Lahou et Songon	88
Figure 30 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville	91
Figure 31 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville effectués sur lames normales (a) et glycolée (b)	92
Figure 32 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville chauffée	92
Figure 33 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon.....	93
Figure 34 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon effectués sur lames normales (a) et glycolée (b).....	94
Figure 35 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon chauffée.....	94
Figure 36 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo effectués sur lames normales (a) et glycolée (b).....	96
Figure 37 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo Chauffée	96
Figure 38 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo	97
Figure 39 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou	97
Figure 40 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou effectués sur lames normales (a) et glycolée (b)	98
Figure 41 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou chauffée.....	99
Figure 42 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Grand-Lahou	103
Figure 43 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Songon	104
Figure 44 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Samo.....	105
Figure 45 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Bingerville.....	106

Figure 46 : Indice Portant (ou CBR) Immédiat des sols étudiés après traitement aux mélanges chaux et ciment	110
Figure 47 : CBR à 95% de l'OPM 4 à jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Grand-Lahou	111
Figure 48 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Songon.....	112
Figure 49 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Samo.....	113
Figure 50 : CBR à 95% de l'OPM 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Bingerville.....	114
Figure 51 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	119
Figure 52 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	120
Figure 53 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	122
Figure 54 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	123
Figure 55 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	125
Figure 56 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Classification des sols latéritiques en Côte d’Ivoire, (LBTP, 1977 ; in BOHI 2008)	5
Tableau II : Classe de trafic estimée en nombre de véhicules par jour (CEBTP, 1980)	14
Tableau III : Estimation de la classe du trafic en nombre de camions poids lourd d’essieux standards de 13 tonnes (CEBTP, 1980)	14
Tableau IV : Répartition des sols en fonction de leur indice CBR (CEBTP, 1984).....	15
Tableau V : Classification des phyllosilicates (MILLOGO, 2008)	27
Tableau VI : Surfaces spécifiques et Capacité d’Echange Cationique de minéraux argileux (MOREL, 2007)	28
Tableau VII : Normes d’essais de prélèvement et d’identification des sols.....	38
Tableau VIII : Normes d’essais d’aptitude et de formulation au traitement de sols	39
Tableau IX : Normes d’essais mécaniques des sols traités.....	39
Tableau X : Localisation des sites de prélèvement de la matière première (coordonnées géographiques et UTN)	41
Tableau XI : Appellation des sols selon les proportions de types de sol.....	49
Tableau XII : Aptitude d’un sol au traitement (LCPC, 2007)	56
Tableau XIII : Classification de la matière organique (ESPITALIE et <i>al.</i> , 1977 ; CASSA et <i>al.</i> , 1994).....	59
Tableau XIV : Position de raies (001) des principaux minéraux argileux (THOREZ, 1976)	62
Tableau XV : Mise en œuvre des mélanges chaux et ciment pour sol remanié Norme Française (NF 94-102-2) (2001)	63
Tableau XVI : Valeurs des contraintes et déformations admissibles des différents matériaux de couche de chaussée.....	74
Tableau XVII : Valeurs des proportions des catégories de grain des sols remaniés de l’étude.....	77
Tableau XVIII : Valeurs des limites d’Atterberg des différents sols remaniés de l’étude.....	80
Tableau XIX : Valeurs de l’essai au bleu de méthylène des différents sols remaniés de l’étude	82
Tableau XX : Valeurs de l’optimum Proctor modifié des différents sols remaniés de l’étude	83
Tableau XXI : Valeurs des CBR à 95% de l’OPM à 4 jours d’immersion dans l’eau des différents sols remaniés de l’étude et leur utilisation sous trafic	85
Tableau XXII : Valeurs des paramètres œdométriques et de gonflement volumique sables argileux étudiés	85

Tableau XXIII : Proportion des teneurs en oxydes des différents sables argileux de l'étude	88
Tableau XXIV : Valeurs du rapport S/R des différents sables argileux	89
Tableau XXV : Valeurs des teneurs en matières organiques des différents sables argileux	90
Tableau XXVI : Synthèse des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment et résistances à la rupture à différents âges de cure.....	128
Tableau XXVII : Module de Young des sables argileux traités aux mélanges de Chaux et ciment déterminé à partir des évolutions contrainte-déformation	129
Tableau XXVIII : Récapitulatif des Coefficients de poisson des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment à différents âges de cure	130
Tableau XXIX : Coefficient de correspondance R_{T90}/R_{T360} et E_{T90}/E_{T360} des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	133
Tableau XXX : Valeurs des contraintes et des déformations admissibles des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.....	135
Tableau XXXI : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou 1	135
Tableau XXXII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou 2	136
Tableau XXXIII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon 1	137
Tableau XXXIV : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon 2.....	138
Tableau XXXV : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo 1	139
Tableau XXXVI : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo 2.....	140
Tableau XXXVII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville 1	140
Tableau XXXVIII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville 2.....	141

RESUME

Les sols latéritiques, longtemps, utilisés en techniques routières, deviennent une ressource rare en Afrique subsaharienne notamment en Côte d'Ivoire. Les ouvrages routiers réalisés à base de ce matériau se dégradent de façon précoce avec un accent particulier sur la côte dans la zone du sud de la Côte d'Ivoire. Cela, du fait des insuffisances des études géotechniques de ce dit matériau. Face aux enjeux économiques et une politique de développement durable, d'autres ressources alternatives, dans l'utilisation des assises de chaussée, s'imposent à l'instar des sables argileux. Toutefois, l'emploi des matériaux sans traitement dans les ouvrages routiers a montré des problèmes mécaniques à cause de la méconnaissance de leurs propriétés géotechniques. L'objectif de cette étude est d'identifier l'influence de l'ajout de la chaux et ciment aux sables argileux du sud de la Côte d'Ivoire pour leur utilisation en techniques routières. L'approche expérimentale a consisté à une analyse physique, chimique et minéralogique des sables argileux couplée aux méthodes d'analyse d'aptitude aux traitements de ce matériau. Des caractérisations de traitements du mélange chaux et ciment ainsi que les résistances à la compression et à la traction à différents âges de cure dans l'eau ont été réalisées sur les sables argileux des localités de Grand-Lahou, Songon, Bingerville et Samo du sud de la Côte d'Ivoire. Après traitements aux mélanges chaux et ciment, les résultats révèlent une augmentation des densités sèches de Songon, Samo et Bingerville respectivement de 1,89 à 1,93 ; de 1,83 à 2 et 1,92 pendant que celles de Grand-Lahou baissent de 1,88 à 1,72. Les indices portants immédiats et après immersion à 4 jours à 95% de l'OPM ont connu une hausse de 40 à 120. Les compressions à 28 jours de cure varient de 1,32 à 3,5 MPa pendant que les tractions passent de 0,16 à 0,25 MPa. A 90 jours de cure dans l'eau, les compressions vont de 2,34 à 4,5 MPa et les tractions de 0,14 à 0,45 MPa. A 360 jours de cure dans l'eau, ces valeurs croissent de 0,75 à 0,85 MPa pour la traction et de 2,77 à 3,77 MPa pour les compressions. Les sols de Grand-Lahou donnent les plus grandes valeurs à la traction et à la compression suivis des sols de Bingerville de Samo et de Songon. Après les calculs expérimentaux au logiciel ALIZE, il ressort que les sols de Songon et Samo présentent les meilleures caractérisations mécaniques aux mélanges de chaux et ciment pour leur utilisation en techniques routières.

Mots clés : Routes, Sables argileux, CBR, Densité sèche, zone du Sud Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Lateritic soils, long used in road techniques, become a scarce resource in sub-saharien Africa, especially in Côte d'Ivoire. Road works made from this material deteriorate early with a particular emphasis on the coastal zone in the southern part of Côte d'Ivoire. This, due to the inadequacies of geotechnical studies of this material. In the face of economic challenges and a sustainable development policy, other alternative resources are needed, such as the clay sands. However, the use of untreated materials in road works has shown mechanical problems due to lack of knowledge of its geotechnical properties. The objective of this study is to identify the influence of the addition of lime and cement to the clay sands of southern Côte d'Ivoire for their use in road techniques. The experimental approach consisted of a physical, chemical and mineralogical characterizations of the clay sands coupled with the methods of characterization of suitability for the treatments of this material. Characterizations of the lime and cement mixture as well as the compressive and tensile strength at different cure ages in eater were carried out on the clay sands of the localities of Grand-Lahou, Songon, Bingerville and Samo of southern Côte d'Ivoire. After treatment with lime and cement mixtures, the results show an increase in dry densities of Songon, Samo and Bingerville respectively from 1.89 to 1.93 ; from 1.83 to 2 and 1.92 while those of Grand-Lahou decreased from 1.88 to 1.72. The immediate and post-immersion bearing indices increased from 40 to 120. The 28 day compressions range from 1.32 to 3.5 MPa while the tractions increase from 0.16 to 0.25 MPa. At 90 days of cure in eater, compressions range from 2.34 to 4.5 MPa and tractions from 0.14 to 0.45 MPa. At 360 days of treatment, these values increase from 0.75 to 0.85 MPa for traction and from 2.77 to 3.77 MPa for compressions. The soils of Grand-Lahou give the highest values to traction and compression followed by the soils of Bingerville de Samo and Songon. After the experimental calculations with the ALIZE software, it appears that the soils of Songon and Samo have the better mécanique characterizations to lime and cement mixtures for used in road techniques.

Key words: Roads, Clay sands, Bearing indices, Dry density, Southern part Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La politique d'aménagement du territoire conduit au développement des infrastructures, telles que les routes, autoroutes, voies ferrées et pistes d'atterrissage, dont les implantations demandent des travaux de terrassement. Il s'agit de la réalisation de remblais de couches de forme et de couches d'assise, etc... (CABANE, 2014). Toutes les couches d'une structure de chaussée méritent que l'on leur accorde une attention en travaux routiers et la couche d'assise est la partie la plus délicate dans ces travaux. Elle a pour rôle de transmettre des contraintes atténuées, causées par le trafic dans la structure de chaussée, aux autres couches sous-jacentes à savoir la couche de forme de la couche de plate-forme ci-après (Figure 3). C'est, donc, une couche fondamentale dont dépend la qualité mécanique d'une route (SOULEY, 2016 ; KATIA, 2017).

En Afrique, plusieurs études menées dans le domaine de la construction routière (LBTP, 1977 ; AUTRET, 1983 ; MESSOU, 1980 ; BOHI, 2008 ; SOULEY, 2016) ont montré l'utilisation des sols latéritiques (SOULEY et *al.*, 2015). Les raisons sont diverses, citons, entre autres, leur abondance. Toutefois, leur utilisation systématique comme matériaux de construction de routes commence à en faire une ressource rare dans la sous-région ouest-africaine (BOHI, 2008 ; SAMB et *al.*, 2013 ; BOUDDLAL et *al.*, 2017). Il en est de même dans certaines parties de la Côte d'Ivoire. L'utilisation des sols latérites va dans le même sens que la construction des chaussées bitumées. On constate que les graveleux latéritiques naturels sont beaucoup employés en structures de chaussées. En effet, à l'exclusion de la frange littorale où la seule ressource en matériaux meubles est le sable, les graveleux naturels représentent sur les 6 800 km du réseau routier bitumé, environ 5 000 km, la longueur des itinéraires dont la couche de fondation est constituée par des graveleux latéritiques (BOHI, 2008).

La plupart des routes réalisées à base de sols latéritiques se dégradent de façon précoce avec un accent spécial dans les régions du littoral, dans le cas particulier de la côtière, reliant Abidjan et San Pédro au sud du pays (Figure 1). L'évolution du contexte économique et les enjeux du développement durable montrent, donc, la nécessité de promouvoir des matières premières alternatives au nombre desquelles : les matériaux naturels (schistes, marnes, ...) (BOUDDLAL et *al.*, 2017), les matériaux recyclés (débris de béton, débris de verre, ...) (BOUDDLAL et *al.*, 2017 ; DJOMO, 2017) et particulièrement les sables argileux. Les sables argileux, compte tenu de la disponibilité des terrains rencontrés du sud de la Côte d'Ivoire sur la figure 5, ci-après, et leur abondance au sud du pays (LBTP, 1977 ; SODEMI, 2010), pourraient constituer une nouvelle approche qui intègre les objectifs du développement

durable (LBTP, 1977 ; ASSALE, 2013). Ceux-ci ont parfois servi à la conception des routes. Toutefois, l'emploi des sables argileux en travaux de construction routière à l'état naturel sans traitement aux mélanges de liants hydrauliques appropriés pose souvent des problèmes tant du point de vue de la résistance mécanique que de la durabilité (DJEDID, 2020).



Figure 1 : Routes à base de sol latéritique dégradées sur la côte du Sud de la Côte d'Ivoire

Les dégradations précoces des routes faites en sables argileux naturels sont récurrentes et sont du fait de son état plastique, du gonflement volumique, de la matière organique et de l'argile de cette matière première. DIOP (2002) révèle que dans les travaux de la construction de l'autoroute Dakar-Thiès, il a été observé la présence, dans la zone reliant les deux localités, des sols argileux gonflants (Figure 2).

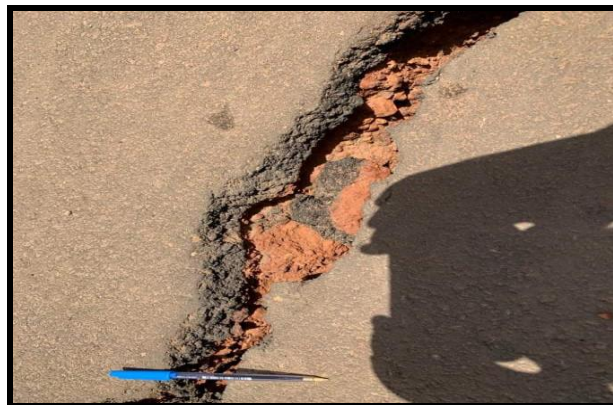


Figure 2 : Sols argileux-gonflants dans la zone de l'autoroute Dakar-Thiès au Sénégal
(Source photographique : YOUM, 2020)

En effet, ce type d'argile, de par leur instabilité sous nos tropiques dominés par une variation saisonnière (saison sèche et saison pluvieuse alternées), constitue un sérieux danger à la bonne tenue des structures routières.

Face à ces terres de mauvaises tenues, le traitement des sols aux liants hydrauliques est devenu l'une des techniques qui s'est développée pour l'amélioration de la qualité mécanique des sols en techniques routières ; cela par des engins plus efficaces et des procédures de mise en œuvre plus rigoureuses (MILLOGO, 2008). La volonté est d'atteindre les caractérisations proches du traitement de la grave au ciment (AUTRET, 1983). En effet, pour AUTRET (1983), un graveleux latéritique traité au ciment se déforme trois à quatre fois plus qu'une grave traitée au même taux de dosage de ciment. En outre, les précédents auteurs n'abordent pas certains aspects géotechniques sur les sables argileux et l'on s'interroge, notamment, sur :

- 1- Quelle est la nature physique, chimique et minéralogique de ce dit sol ?
- 2- Quelle est son aptitude aux traitements et quel traitement aux liant hydraulique, approprié, apporter à ce sol ? Quelles seraient ses caractérisations physiques et mécaniques avant et après traitement aux liants hydrauliques ?
- 3- Puis, quelle serait son application dans les méthodes rationnelles de dimensionnement de structure de chaussée routière ?

C'est, pour comprendre le comportement des sables argileux face aux liants hydrauliques qu'est élaboré ce travail, intitulé : « Etude des sables argileux du sud de la Côte d'Ivoire utilisés en techniques routières : Influence des traitements aux mélanges chaux et ciment ».

L'objectif principal de ce travail est d'identifier l'influence des traitements aux mélanges chaux et ciment sur les sables argileux du Sud de la Côte d'Ivoire dans leur utilisation en techniques routières.

Pour atteindre l'objectif principal, les objectifs spécifiques qui en découlent sont les suivants :

- 1- Identifier et caractériser les sables argileux afin de connaître la nature de cette matière première ;
- 2- Traiter les sables argileux par l'ajout du mélange de stabilisants tels que la chaux et le ciment en vue d'améliorer leurs caractérisations mécaniques ;
- 3- Déterminer les caractérisations géotechniques des sables argileux après traitement approprié aux mélanges chaux et ciment à 28 jours, 90 jours et 360 jours de cure ;
- 4- Réaliser un dimensionnement de chaussée à l'aide du logiciel ALIZE.

En harmonie avec les objectifs fixés, cette thèse est composée de sept (7) chapitres regroupés en trois parties :

- La première partie concerne la synthèse bibliographique où l'on a : Le chapitre (I) qui fournit les généralités sur des bases routières et porte sur les caractérisations minéralogiques, physiques et chimiques des sables argileux, le chapitre (II) s'articule autour des réactions liants hydrauliques (chaux-ciment) - sol argileux, réactions physico-chimiques du ciment et de leur influence sur les propriétés géotechniques et mécaniques des matières premières et le chapitre (III) qui concerne les orientations sur la qualité des prélèvements et d'identification des sols, l'essai d'aptitude et de formulation des traitements aux liants hydrauliques de sols et les essais mécaniques des sols traités aux liants hydrauliques.

- La deuxième partie comporte le matériel et les méthodes expérimentales utilisés pour la réalisation de cette étude. Elle comprend le chapitre (IV) qui présente : les sites de prélèvement, la matière première, les liants hydrauliques (chaux et ciment) et le matériel utilisé au cours de cette étude puis décrit les différentes méthodes expérimentales utilisées pour atteindre les objectifs spécifiques avec les modes opératoires ;

- La troisième partie donne les résultats de laboratoire, leurs interprétations ainsi que la discussion qui en résulte. Il s'agit d'abord des essais d'identification de la matière première chapitre (V), ensuite le traitement des sables argileux aux mélanges chaux et ciment chapitre (VI) et enfin sur la détermination des caractérisations mécaniques des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment suivi du dimensionnement de structures de chaussée au chapitre (VII).

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. GENERALITES

Les généralités fournissent les bases de la construction routière et portent également sur les caractérisations minéralogiques, physiques et chimiques des sables argileux.

I.1. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA CONSTRUCTION ROUTIERE

Pour la conception des assises de chaussée, le LBTP (1977) a classé les sols ivoiriens en trois grandes catégories en fonction de leurs indices portant *Californian Bearing Ratio* (I_{CBR}) ou CBR à 95% à 4 jours d'immersion dans l'eau, leurs Indices de Plasticité (IP) similaire au tamisât en éléments fins (passant au tamis de 80 μm) ou plasticité en teneur en fine (f), la densité sèche maximale de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) et la teneur en eau optimale correspondant à des qualités géomécaniques de Graveleux Latéritiques (GL) de type : GL1, GL2 et GL3 où GL1 est de qualité supérieure à GL2 et GL3 et GL2 de qualité supérieure à GL3 (Tableau I).

Tableau I : Classification des sols latéritiques en Côte d'Ivoire (LBTP, 1977 ; in BOHI, 2008).

Sols latéritiques	Indice de plasticité (IP)	Tamisât à 80 μm ou plasticité teneur en fine (f)	Valeurs moyennes de certaines caractérisations géotechniques		
			I_{CBR} à 95% OPM à 4 jours d'immersion	Densité sèche maximale à l'OPM	Teneur en eau optimale
GL1	$5 < IP < 15$	$5 < f < 15$	30 à 80	2,10 à 2,30	5 à 8%
GL2	$15 < IP < 25$	$15 < f < 25$	20 à 50	2,0 à 2,25	9 à 10%
GL3	$25 < IP < 35$	$25 < f < 35$	15 à 40	1,9 à 2,20	8 à 12%

GL1 : Graveleux Latéritique de type 1, *GL2* : Graveleux Latéritique de type 2, *GL3* : Graveleux Latéritique de type 3

Ces travaux repris par MESSOU (1980) ont montré que pour une utilisation en couche de base, il a fallu faire un traitement au ciment avec des pourcentages qui varient de 0 à 6%. Après essai de résistance à la compression et de résistance à la traction, il ressort qu'à 4% de dosage en ciment, la résistance à la compression atteint 40 bars à 90 jours de cure dans l'eau et la résistance à la traction atteint 2 bars à 90 jours de cure dans l'eau.

Aussi, l'étude de MOREL (1984) a mis en évidence le fait que les sols fins plastiques doivent subir un prétraitement à la chaux de 1,5% avant de les traiter au ciment à 7%. Ses résultats ont été tels qu'après un (1) an de durcissement en cure dans l'eau, il obtient les caractérisations mécaniques suivantes :

- résistance à la compression simple : 10 MPa ;
- résistance à la traction : 0,7 MPa ;
- et IQE (Indice de Qualité Elastique) ; 27 cm.

DELFAUT (1990) a traité, pour sa part, à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacien de la région parisienne. Il ressort que la détermination des dosages respectifs des deux stabilisants doit faire l'objet d'une étude en laboratoire en raison de la gamme étendue des plasticités pour chaque type de sol. A ce sujet, il a par ailleurs indiqué qu'une plasticité après traitement du sol à la chaux est recherchée et traduite par un indice de plasticité n'excédant pas 13% pour permettre au ciment d'agir et d'avoir, par la suite, sur le chantier un matériau manipulable. Les dosages qu'il retient pour obtenir une résistance suffisante sont respectivement de 5% pour la chaux vive de formule chimique CaO fortement basique qui réagit avec de l'eau pour donner l'hydroxyde de calcium $(Ca(OH)_2)$ et de 6% pour le ciment portland pur appelé CLK 45.

En outre, les travaux de MILLOGO (2008) sur les sols du Burkina Faso ont mis en évidence l'influence du traitement à la chaux et au ciment des sols argileux. De ces travaux, il ressort que l'apport de 2% de ciment est suffisant pour obtenir un bon matériau de couche de base en construction routière. Pour cet auteur, l'ajout du ciment aux graveleux latéritiques induit la formation de la tobermorite dont l'une des formules chimiques est $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2.4H_2O$ qui est un Silicate de Calcium Hydraté (CSH), de l'ettringite $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} ; 26H_2O$, de la portlandite de formule chimique $Ca(OH)_2$, de la calcite de formule chimique $CaCO_2$ et d'un oxyhydroxide de fer $Fe(OH)_3$. Ces éléments sont responsables de l'homogénéité de la microstructure et de l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des sols traités aux liants hydrauliques. Ces impacts positifs sont essentiellement dus au développement de cette tobermorite qui dérive essentiellement de la réaction d'hydratation du ciment. Par ailleurs, l'ajout de la chaux de formule CaO à une matière première argileuse riche en quartz de formule chimique SiO_2 induit la formation de calcite et de silicate de calcium hydraté. Ce dernier composé est essentiellement formé par la réaction entre la chaux et le quartz fin, et contribue au renforcement, dans le temps, des éprouvettes crues avec des quantités croissantes de chaux vive broyée ($\leq 12\%$ en masse) qui sont ajoutées à la matière première argileuse. Il

informe cependant que, la formation de la portlandite, de la calcite et d'une faible quantité de CSH affectent négativement la résistance mécanique de ces éprouvettes crues. Finalement, pour la confection des éprouvettes (mélange de sol et liants hydrauliques) aux propriétés performantes à base de mélange argile-chaux-ciment, il est recommandé de réduire la taille (diamètre) des grains de quartz, augmenter la durée d'hydratation (temps de cure dans l'eau) et d'éviter le contact entre l'éprouvette et l'air.

En France, les travaux de TRAN (2009) ont valorisé l'utilisation des sédiments marins et fluviaux en technique routière. Celui-ci a mis en évidence, les caractérisations mécaniques des sédiments étudiés vis-à-vis des contraintes imposées pour une utilisation en techniques routières, des correcteurs granulométriques (sable de dragage et sable du Boulonnais) ont été utilisés. Les mélanges granulaires déduits sont ensuite traités au ciment et à la chaux pour améliorer leurs caractérisations mécaniques (2% de chaux et 6% de ciment). Un effet très positif de la chaux est observé au niveau des caractérisations mécaniques des formulations à base des sédiments marins ; mais, cela produit un effet contraire à base des sédiments fluviaux.

MELLAL et *al.* (2010) ont pour leur part effectué le traitement d'une marne argileuse avec 2% de chaux en vue d'exécuter un remblai routier localisé au niveau d'un axe secondaire de l'autoroute Est-Ouest en Algérie. Une série d'essais a été établie pour contrôler l'exécution et le compactage des couches. A court terme de la réalisation, l'on remarque que la marne est passée d'un état déformable, collant difficilement compactable à un état rigide, flottant, friable plus facile à travailler. Le contrôle de la compacité et de la portance des couches traitées a donné des résultats satisfaisants marqués par une augmentation de ces paramètres.

Les travaux de MAHAMAT (2012) ont démontré à partir des essais de caractérisation, que les sols du Burkina Faso ne pouvaient pas être utilisés en couche de base à l'état naturel dans le cas des sols de Boromo et de Bobo-Dioulasso. En effet, leur indice CBR est de 55 à 98% de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) à 4 jours d'immersion qui reste inférieur à 80 imposés par le Cahier de Prescription Technique (CPT). Les sols ont été améliorés au ciment avec différentes proportions (1 ; 2 ; 2,5 ; 3 et 4%) afin d'observer l'évolution de l'indice CBR à 98% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau et de la résistance à la compression simple. L'indice portant *Californian Bearing Ratio* à 98% de l'*Optimum Proctor Modifié* du graveleux latéritique passe de 55 à l'état naturel à 340 à 2,5% de ciment pour 25 coups tandis que la résistance à la compression simple passe de 18,15 kg/cm² à l'état naturel à 25,01 kg/cm² à 2,5% de ciment à 25 coups. Ainsi, l'amélioration à 2,5% de ciment donne les

résultats conformes aux spécifications du Cahier de Prescription Technique (CPT) en ce qui concerne l'indice portant CBR et la Résistance à la Compression simple (RC).

ABDO (2008), sur le traitement des sols aux liants hydrauliques en vue de les valoriser en construction routière, montre que pour la reconnaissance sur les sols, le prélèvement d'échantillon doit être représentatif du gisement (sols, matériaux de la chaussée existante, matériaux recyclés), la caractérisation des matériaux prélevés doit se fonder sur la granularité ou l'argilosité à travers les paramètres d'Indice de Plasticité (IP) ou de Valeur au Bleu sur les Sols (VBS). Pour cet auteur, le traitement au ciment ou Liant Hydraulique Routier (LRH) des sols est approprié si : $IP \leq 12\%$ ou $VBS \leq 2,5$. Et dans le cas contraire, le traitement mixte chaux et ciment des sols serait adapté pour : $IP > 12\%$ ou $VBS > 2,5$, auxquels la teneur en eau naturelle, l'Optimum Proctor Normal (OPN) ou Modifié (OPM) et l'identification d'éventuels produits inhibiteurs de prise peuvent s'adjoindre.

I.2. DEFINITION DE LA ROUTE ET DE LA CHAUSSEE

La route peut être définie comme un ouvrage d'ingénierie (génie civil) composé d'une ou de plusieurs couches de matériaux disposée(s) sur un espace linéaire aménagé pour faciliter la circulation sécuritaire des véhicules et des personnes (KOUBIKANA, 2013). Celle-ci comprend : une chaussée, deux accotements et des signalisations (MENGUE et *al.*, 2015) sur la Figure 3 ci-après. La chaussée désigne l'ensemble des couches reposant sur la plate-forme (ou sol support). Une chaussée est donc une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (GTR, 2014). Il existe trois principales catégories de chaussées : les chaussées souples ou flexibles, les chaussées rigides et les chaussées mixtes. La caractéristique principale d'une chaussée flexible, par rapport à une chaussée rigide, est son aptitude à se déformer sans se fissurer (GUEYE, 2007). Les chaussées mixtes ou hybrides, sont généralement constituées, d'une couche supérieure présentant ; cohésion et rigidité. Ces couches de bases rigides sont souvent des graves stabilisées au bitume ou au ciment ou au béton très peu dosé. Ainsi, ces couches sont plus flexibles que les bétons classiques, mais moins résistantes.

I.2.1 CHAUSSEE

La chaussée est une structure multicouche mise en œuvre sur une plate-forme support de sol terrassé. Elle supporte plusieurs types de sollicitations : répartition de la contrainte des charges verticales (référence : essieu standard de 130 kN), sollicitations tangentielles dues au

passage des véhicules (mouvement entraînant des efforts horizontaux), sollicitations climatiques (BRABET, 2012).

Elle comporte aussi, une couche de roulement ayant pour rôle essentiellement d'imperméabiliser l'assise ou corps de chaussée et de la protéger contre l'agression du trafic. Les chaussées souples sont constituées de trois (3) ou plusieurs couches appelées de bas en haut ; une couche de forme (qui est éventuelle), une (1) ou deux (2) sous-couches (éventuelle) qui constituent la couche de plate-forme, une couche de fondation (éventuelle), une couche de base et une couche de surface (constituée éventuellement d'une couche de liaison et d'une couche de roulement) comme représenté ci-dessous (Figure 3).

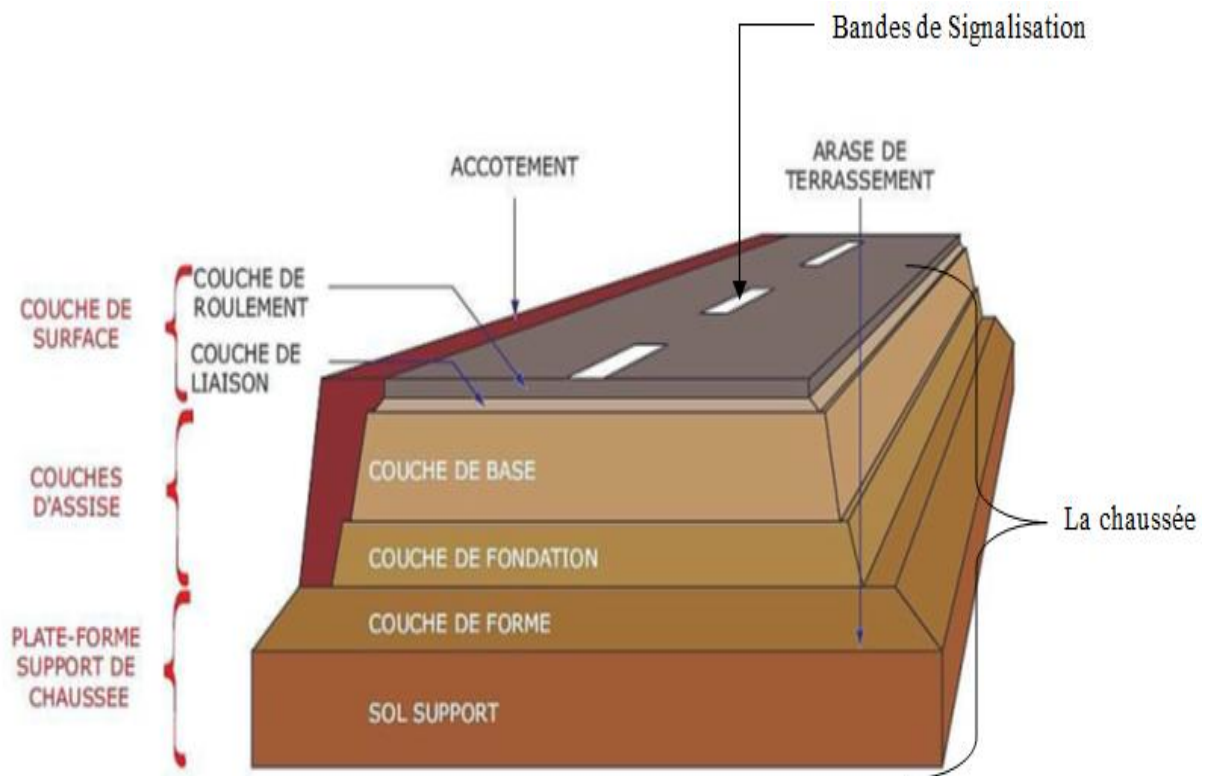


Figure 3 : Structure générale d'une chaussée (MENGUE et *al.*, 2015).

I.2.2. PLATE-FORME

La plate-forme constitue l'infrastructure de la chaussée. Elle requiert un traitement tout particulier, puisque la plupart des méthodes de dimensionnement s'appuie sur la résistance au poinçonnement du sol de plate-forme. Un bon sol de plate-forme devrait avoir un CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau (*Californian Bearing Ratio*) supérieur à 5 pour permettre aux engins de chantier de passer au moment de la mise en œuvre des matériaux lors des travaux et devrait faire l'objet d'un bon compactage. Ainsi, en fonction du CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion, l'on a la classification suivante pour la plate-forme (CEBTP, 1984) :

- Infrastructures faibles $CBR < 5$
- Infrastructures moyennes $5 < CBR < 10$
- Infrastructures bonnes $10 < CBR < 20$
- Infrastructures excellentes $CBR > 20$

Si le sol de plate-forme présente des caractérisations telles que le CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion est faible inférieur à 25, la teneur en eau élevée supérieure à 12%, le sol est amélioré ou stabilisé par ajout d'un sol plus grossier ou traité chimiquement à la chaux par exemple. La plate-forme peut être constituée d'un sol d'apport ou du sol naturel sur lequel une couche de forme pourrait être mise.

I.2.3. COUCHE DE FORME

Elle est employée lorsque le terrain naturel présente des caractéristiques particulièrement médiocres et hétérogènes. La couche de forme qui est rattachée aux terrassements dont elle constitue la partie supérieure doit notamment permettre le passage des engins de chantiers (zones marécageuses ou sableuses par exemple) ainsi que le compactage de la couche de fondation (BUFALO et *al.*, 2009). Dans ce cas, elle diminue les déformations de la chaussée sous l'influence des variations saisonnières.

I.2.4. SOUS-COUCHES

Le rôle de la sous-couche est de constituer dans certains cas particuliers soit un écran entre les matériaux mis en œuvre dans les terrassements et ceux qui sont employés en couche de fondation (ou en couche de base si la couche de fondation est supprimée), soit un filtre. On distingue principalement, en Afrique, deux types de sous-couches (MOKHTARI et *al.*, 2017) qui sont énumérés comme suit :

- une sous-couche anti contaminante qui constitue un écran contre la remontée d'éléments argileux ou limoneux dans la chaussée ;
- une sous-couche anti capillaire qui est un écran contre les remontées d'eau dans le corps de chaussée, sous l'action des forces capillaires.

I.2.5. COUCHE DE FONDATION

C'est une couche au-dessus de la couche de plate-forme. La couche de fondation permet d'assurer une répartition homogène des contraintes sur la couche de forme ou sur la couche de plate-forme supérieure des terrassements (WADAGNI, 2019). La couche de fondation assure une diffusion des contraintes afin de les amener à un taux compatible avec la portance de la couche de plate-forme. Si la couche de fondation n'est pas trop rigide, elle ne subit guère des contraintes verticales de compression. Elle est généralement constituée d'un matériau grossier (gravier ou pierre concassée de 7,5 cm) dans lequel l'angle de frottement élevé permet une meilleure capacité portante. L'épaisseur minimale de cette couche est généralement de 20 cm. Les matériaux de la couche de fondation doivent être de qualité satisfaisante (CBR de 30 au minimum) afin d'assurer sa fonction de diffusion des contraintes. Au cas contraire, elle devra faire l'objet d'un traitement. Dans ce cas, le CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des fondations traitées aux liants hydrauliques doit être compris entre 70 et 100.

I.2.6. COUCHE DE BASE ET COUCHE DE SURFACE

La couche de base est soumise à des contraintes verticales de compression plus élevées que dans la couche de fondation ainsi qu'aux efforts de cisaillement d'autant plus importants que la couche de surface est mince. C'est la raison pour laquelle elle représente la couche principale. Cette couche est généralement réalisée avec un matériau grossier (gravier ou pierre concassée) sur une épaisseur minimale de 15 cm, en général. Ce matériau utilisé doit présenter un CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau supérieur ou égal à 80. Sinon il devra faire l'objet d'un traitement approprié soit avec un liant hydraulique, soit avec un liant hydrocarboné. Dans ce cas, le CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau visé doit être supérieur ou égal à 160. La couche de base est faite en graveleux latéritique ou en sable argileux ou en concassé de granularité (dense ou ouvert) et peut être traité aux liants hydrauliques (LBTP, 1977 ; CEBTP, 1980).

La couche de surface constitue le revêtement de la chaussée. Elle est constituée de la couche de roulement et la couche de liaison. La première est la couche supérieure de la structure de

chaussée sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. La seconde (couche de liaison ou couche d'accrochage) se situe entre la couche de base et la couche de roulement. Cette couche doit avoir les qualités mécaniques et physiques suivantes :

- résister, sans déformations manifestes ni usures rapides, aux efforts normaux et aux efforts tangentiels imposés par les pneumatiques ;
- présenter un uni de surface durable, de façon à assurer un confort de roulement aux usagers ;
- être étanche pour protéger le corps de la chaussée contre les infiltrations des eaux de ruissellement.

I.3. PARAMETRES DE CONCEPTION ROUTIERE

La construction d'une route de qualité, liée à sa structure, implique plusieurs paramètres. C'est pourquoi, bien que la mission de l'étude soit l'amélioration de l'assise de chaussée, il est nécessaire de présenter brièvement ces paramètres sans lesquels une route construite ne pourrait atteindre sa durée de vie. Ces paramètres sont présentés ci-dessous :

- le trafic ;
- la portance du sol support ;
- les matériaux ;
- l'environnement ;
- la climatologie ;
- l'hydrologie ;
- l'hydraulique.

1) En ce qui concerne le trafic

Les études de trafic constituent une approche essentielle de la conception des réseaux routiers. Elles permettent de faire des prévisions sur les réseaux routiers en tenant compte d'autres modes de transport susceptibles de venir en concurrence à la route (BERNADET et *al.*, 2010). Ces prévisions sont nécessaires en vue de :

- définir les caractéristiques techniques des différents tronçons de route, constituant le réseau routier, qui doivent être adaptés au volume et à la nature des circulations attendues ;

- estimer les coûts de fonctionnement des véhicules dans le cas où ces coûts sont fonction du trafic, en circulation gênée, lorsqu'on s'approche de la saturation ;
- estimer les coûts d'entretien du réseau routier qui sont fonction du volume de la circulation (trafic) ;
- apprécier la valeur économique des projets routiers et, en particulier, effectuer les calculs économiques d'optimisation de l'allocation des ressources financières affectées au réseau routier.
- prendre en compte le poids lourd qui est le véhicule dont la charge utile dépasse 3,5 tonnes. Ce trafic est constitué généralement de camions, de semi-remorques et de bus articulés.

Le poids du véhicule est transmis à la chaussée, sous forme de pressions par compression à travers les pneumatiques. Pour un véhicule, cette pression est de l'ordre de 0,2 MPa. Mais, elle est de l'ordre de 0,66 MPa sous une roue de camion (Figure 4) ci-dessous.

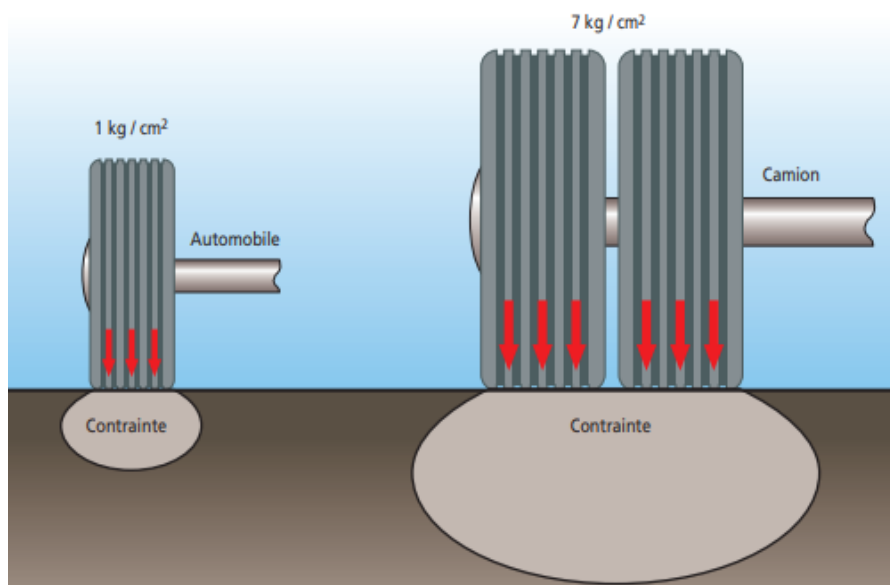


Figure 4 : Schéma illustrant les agressivités de la chaussée par un véhicule léger et un poids lourd (SETRA, 2009 : in CIM-BETON, 2019).

Les classes de trafic retenues sont définies de plusieurs façons en fonction du degré de précision des données disponibles :

- trafic journalier de toutes les catégories de véhicules confondus (Tableau II) ci-après ;
- trafic cumulé de poids lourds, calculés et ramenés à l'encombrement selon les équivalences, de l'essieu standards de 13 T présenté (Tableau III) suivant.

Tableau II : Classe de trafic estimée en nombre de véhicules par jour (CEBTP, 1980)

Classe de Trafic	Nombre de véhicules/jour
T1	< 300
T2	300-1000
T3	1000-3000
T4	3000-6000
T5	6000-12000

Tableau III : Estimation de la classe du trafic en nombre de camions poids lourd d'essieux standards de 13 tonnes (CEBTP, 1980).

Classe de Trafic	Nombre de camions d'essieux standard de 13T
T1	10^5 - 5.10^5
T2	5.10^5 - 15.10^5
T3	15.10^5 - 40.10^5
T4	40.10^5 - 100.10^5
T5	100.10^5 - 200.10^5

2) Pour la portance du sol support

Selon le guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, la portance du sol support est un paramètre très important dans la pérennité d'une route car quelle que soit la qualité des matériaux d'apport, le sol support constitue un vecteur de ruine de la route s'il est d'une très mauvaise qualité. L'étude du comportement du sol support permet, en ce qui concerne les matériaux de construction, de choisir un type de sol d'apport qui convient et, éventuellement, de prévoir un traitement adéquat du sol d'assise de chaussée. Elle permet également d'effectuer le choix du type de fondation des ouvrages à réaliser. Pour le CEBTP (1984), il existe cinq classes de sols qui ont été retenues et qui correspondent à une répartition assez constante des divers sols rencontrés en pays tropicaux (Tableau IV) ci-après.

Tableau IV : Répartition des sols en fonction de leur indice CBR (CEBTP, 1984).

Classe de sol	CBR	Type de sol
S1	CBR<5	Sols à minéraux bruts
S2	5<CBR<10	Sols hydromorphes
S3	10<CBR<15	Sols halomorphes
S4	15<CBR<30	Sols ferralitiques
S5	CBR>30	Sols ferrugineux

3) Concernant les matériaux et autres paramètres

Ces paramètres seront, étroitement, sujets à une mise en œuvre rigoureuses consécutives à des choix techniques préalables qui prennent en compte l'environnement global du projet.

I.4. MISE EN ŒUVRE

Dans la mise en œuvre sur le chantier routier, plusieurs paramètres sont concernés. Mais pour le cas particulier des matériaux les plus importants, ce sont les paramètres géologiques et environnementaux qui sont concernés. Ainsi, le dernier paramètre dépend d'un certain nombre de facteurs tels que : le climat et le relief.

1) D'abord le climat

Les cycles saisonniers (soleil, pluie...) influencent le comportement d'une chaussée par leurs actions sur les divers constituants de la chaussée (variation des propriétés mécaniques des matériaux). Dans le domaine routier, le facteur climatologique joue un rôle important, au niveau des études de faisabilité sur les aspects suivants :

- teneur en eau du sol support et des matières premières d'apport ;
- érosion ;
- choix des matériaux et des liants.

En ce qui concerne le dernier aspect, le choix des matériaux repose, en général, sur un certain nombre de classifications telles que citées ci-dessous :

- classification selon HRB ou *High Research Board* (MILLOGO, 2008) ;
- classification USCS ou *Unified Soil Classification System* (GTR, 2014) ;
- classification GTR-Guide de Terrassement Routier (GTR, 2014);
- classification LPC-Laboratoire des Ponts et Chaussées (MAGNAN, 2015) ;

- Classification Ivoirienne du Laboratoire du Bâtiment et de Travaux Publics (LBTP, 1977).

Ces différentes classifications sont définies selon les recommandations suivantes :

Classification du High Research Board (HRB)

Selon cette classification les sols doivent répondre aux spécificités suivantes :

Granulométrie : 0/20

- Pourcentage des fines (passant au tamis de 80µm) < 35%,
- Refus au tamis de 2 mm compris entre 50% et 80%,
- Indice de portance CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion 18 à 80%.

Classification du Unified Soil Classification System (USCS)

Les grandes divisions du système USCS à considérer sont :

- les sols à grains grossiers,
- les sols à grains fins,
- les sols organiques,
- les tourbes.

Classification du Guide de Terrassement Routier (GTR)

La classification GTR se compose de cinq classes regroupées en trois familles :

- les sols de classe A, B, C, D,
- les matériaux rocheux de classe R,
- les sols organiques et sous-produits industriels de classe F.

Classification du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC).

La classification LPC a été publiée par SCHON en 1965 et modifié par MAGNAN en 2015.

On distingue trois classes de sols à savoir :

- les sols rocheux ;
- les sols grenus (sables et graves) ;
- les sols fins (argiles, limons et sols organiques)

Classification ivoirienne (LBTP, 1977)

Cette classification retient trois types de sols latéritiques, elle est basée sur la proportion des grains fins notée (f) de diamètres inférieurs à 80 micromètres d'un sol, de son Indice de Plasticité (IP) et du produit des deux (f x IP).

Les trois types de sols définis sont : GL1, GL2, GL3 (LBTP, 1977) (Tableau I).

Le climat prédétermine les conditions d'exécution des travaux. Il convient donc de connaître exactement les contraintes et les avantages climatiques d'une région afin de fixer les déroulements des chantiers.

En outre, en fonction de la nature des sols, on distingue sept (7) régions géotechniques notées (R1 à R7) présentées sur la figure 5.

- La région R1 correspond à une région pourvue en sables, pauvre en graveleux et en roches massives.
- La région R2 correspond à une région pourvue en graveleux de quartz relativement plastique (type GL2 et GL3).
- La région R3 correspond à une région pourvue en graveleux relativement plastique (type GL2 et GL3). Roches, le plus souvent, granitiques avec quelques passages schisteux.
- La région R4 caractérise une région pourvue en graveleux relativement plastique au Sud (type GL2 et GL3).
- La région R5 caractérise une région pourvue en graveleux ferrugineux (type GL1 et GL2) et en arènes sableuses.
- La région R6 caractérise une région pourvue en graveleux ferrugineux (type GL1 et GL2) et en arènes sableuses et en roches granitiques.
- La région R7 caractérise une région de montagne pourvue en site de roches massives (granitiques) mais aussi en graveleux peu plastiques.

2) Ensuite le relief

Le type de relief qui conditionne le drainage a également une influence sur le processus de latérisation dans la mesure où il favorise ou défavorise l'accumulation d'eau (AUTRET, 1983). Par ailleurs, MASSAMBA (2013) souligne que l'érosion produite par les eaux de ruissellement dépend de leur importance et de la raideur de la pente.

C'est après l'étude de tous ces paramètres que l'on peut songer à la réalisation d'un véritable dimensionnement.

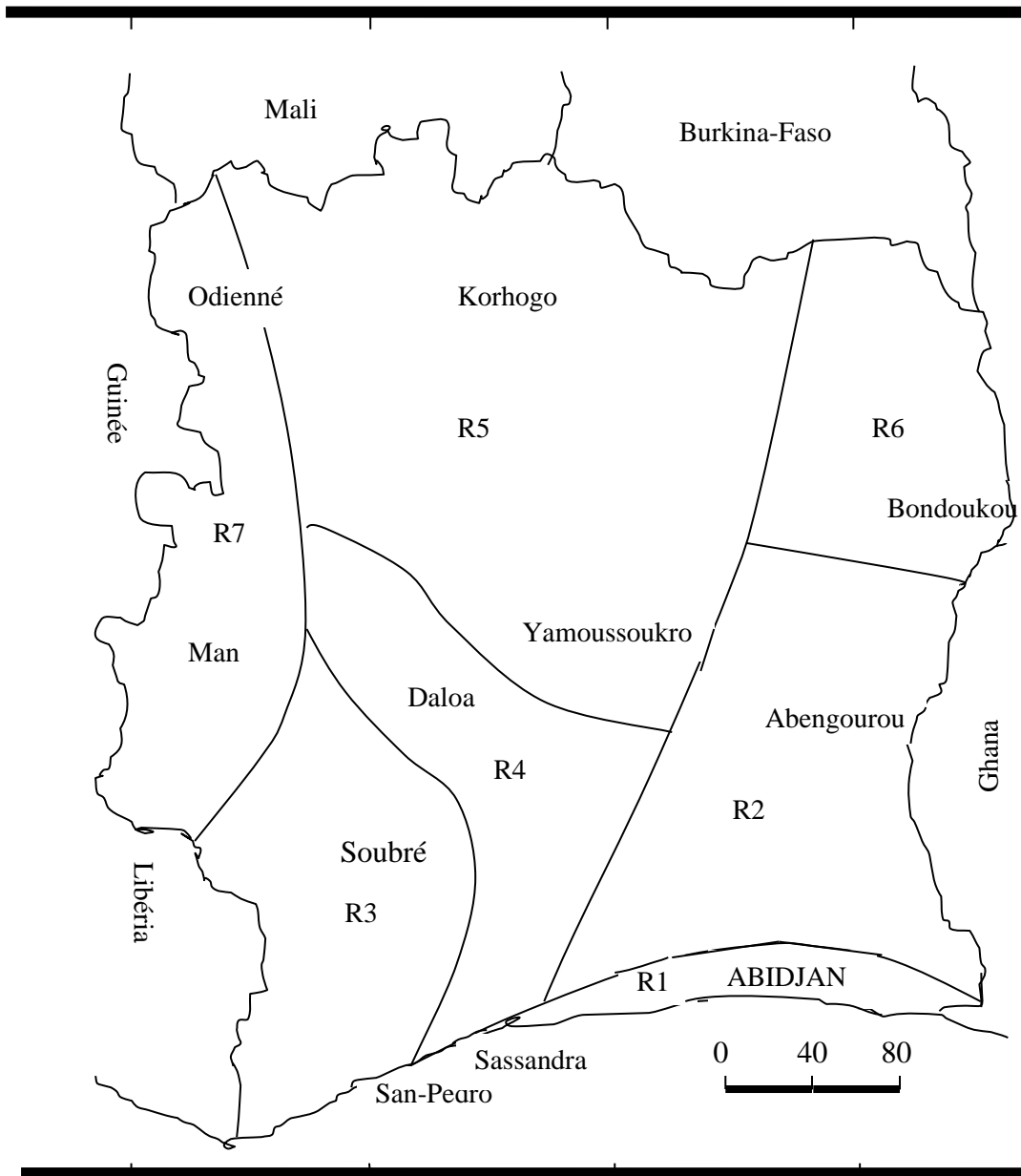


Figure 5 : Carte de répartition géotechnique des sols en fonction des régions (LBTP, 1977).

I.5. GENERALITES SUR LES CARACTERISATIONS MINERALOGIQUES ET PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SABLES ET DES ARGILES

I.5.1. DEFINITION ET FORMATION DES SABLES

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches préexistantes. Les sables sont des grains de roches ou de minéraux ayant un diamètre compris entre 0,0625 mm et 2 mm ou 4, 75 mm et 5 mm, selon le système de classification utilisée (BEDARD, 2014). Le sable se forme à la suite de phénomènes physiques et chimiques auxquels sont soumises les roches (in KOUADIO, 2010). Les processus physiques débitent les roches en des éléments de taille réduite qui sont les blocs, les graviers, les sables, les limons et les argiles ; ces processus sont favorisés par le climat (variation de température). Dans le processus de formation des sables l'action physique est prépondérante. Sous l'action de processus physiques (vent, eau) ou chimiques (action dissolvante de l'eau), ces éléments sont entraînés par les eaux de ruissellement. Au cours du transport, ils vont subir des variations de taille et de morphologie en fonction du moyen et du mode de transport (FOUCAULT et *al.*, 1995). Les particules vont se déposer ou être drainées généralement jusqu'à la mer. C'est ainsi que les sables se retrouvent sur les plages ou dans les lits des cours d'eau.

1) Composition minéralogique des sables

Les sables sont principalement constitués de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants majoritaires : on parle ainsi de sables quartzeux, feldspathiques, ferrugineux, micacés, calcaires ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux.

En géologie de l'ingénieur ou génie civil, les sables sont classés en fonction de la granulométrie.

2) Classification des sables suivant la granulométrie

Dans ce type de classification, le critère principal pris en compte est la taille des particules (FOUCAULT et *al.*, 1995) (Figure 6) ci- après. Tous les systèmes de classification admettent principalement trois sous- classes qui sont :

- le sable fin,
- le sable moyen,
- le sable grossier.

Cependant, les limites de chaque sous-classe peuvent varier suivant les systèmes de classification ou le domaine d'activité.

Pour la suite de ces travaux l'on appliquera les limites données par la norme Française (XP P 94-011) (1999) (Tableau IV) ci-après.

Selon cette classification, l'on appelle sable, les particules de sol dont le diamètre des grains est compris entre 0,063 et 2 mm. Dans cet intervalle ; les sables fins ont un diamètre compris entre 0,063 et 0,2 mm, le diamètre des sables moyens varie entre 0,2 et 0,63 mm et quant aux sables grossiers, leur diamètre est compris entre 0,63 et 2 mm (Figure 6) ci-dessous.

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	Unités (Ø)	
	Pelites		10 µm	Aleurites		100 µm	Sables		1 mm	Gravier		10 mm	Galets		100 mm	Blocs		N.M. STRAKHOV			
Pré-Colloïdes	2 µm	Limons		20 µm	Sablons		200 µm	Sable		2 mm	Gravillons		20 mm	Galets ou cailloux		200 mm	Blocs		A. CAILLEUX		
Clays (argiles)	=3.9 µm		1/2 56 mm		= 62,5 µm		1/16 mm		Sands (Sables)		2 mm	4 mm Granulés		Pebbles (Graviers petits cailloux)		64 mm	Cobbles (gros cailloux)		256 mm	Boulders (blocs)	C.K. WENTWORTH
LUTITES					ARENITES					RUDITES											

Figure 6 : Classifications granulométriques des sables (FOUCAULT et al., 1995)

I.5.2. DEFINITION ET FORMATION DES ARGILES

Il n'existe pas de définition unique pour le mot « argile » (in BOHI, 2008). La définition dépend de la discipline d'étude ou du domaine d'activité (Géologie, Génie civil, Pédologie, Céramique...). Etymologiquement, le mot argile vient du mot grec "argilos"; lui-même dérivé de "l'argos" ou du latin qui veut dire " argillas"; c'est la couleur (blanche) de ce matériau utilisé en céramique qui lui a valu ce nom. Ce terme désigne actuellement à la fois :

- une taille de particule,
- un minéral,
- une roche.

Une argile est donc soit une particule dont le diamètre est inférieur à deux microns mètres ($< 2 \mu\text{m}$), soit un minéral appartenant au groupe des phyllosilicates, soit une roche essentiellement composée de minéraux argileux (CAILLERE et *al.*, 1982 ; EMERUWA, 2000). L'homme utilise les argiles depuis longtemps pour les nombreuses propriétés qu'elles possèdent. Ces propriétés sont essentiellement liées à leur structure particulière et complexe dont sont évoqués quelques aspects.

Les argiles se forment à la suite de phénomènes physiques et chimiques connus sous l'appellation d'altération auxquels sont soumises les roches. Selon une recommandation des comités de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA) et de la *Clay Minerals Society* (CMS), il faut distinguer les termes « argiles » et « minéraux argileux » :

- les « minéraux argileux » se rapportent principalement aux phyllosilicates et aux minéraux qui confèrent une plasticité à l'argile et qui durcissent lorsqu'ils sont séchés ou cuits.

- le terme « argiles » fait référence au matériau naturel constitué de minéraux argileux mais aussi des minéraux associés qui, eux, n'induisent aucune plasticité (quartz, calcaire, gypse $\text{CaSO}_4(2\text{H}_2\text{O})$, oxyde, hydroxyde, sulfure...) et ne durcissent pas forcément au séchage et à la cuisson. Les minéraux argileux se forment principalement par hydrolyse qui varie selon les latitudes traduites ci-après (Figure 7). Ainsi, l'on a, lors qu'on est :

- **en région tempérée** : la bisiallisation

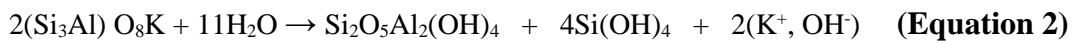
Dans ce cas, l'altération des silicates, comme les feldspaths, va aboutir à la formation de l'illite ou de la smectite, donc à un minéral de type TOT ; on parle de bisiallisation, au cours de laquelle, il y a départ de 50% de silicium Si et de 80% de potassium K suivant l'équation 1 ci- après qui résume l'action de l'eau sur l'orthose dans ce milieu comme suit :



soit : Orthose + eau → Illite

- **en région tropicale** on a la monosiallisation

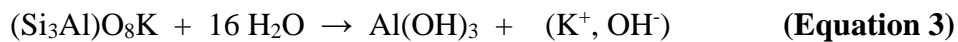
A ce niveau, l'altération est plus poussée car la température est plus élevée, l'argile produite est la kaolinite avec une structure de type TO ; on parle de monosiallisation. La formation de la kaolinite se fait par la perte de 62% de silice Si et de la totalité du Fer Fe. Cette formation nécessite un milieu bien drainé et se caractérise par l'équation 2 ci-dessous qui résume l'action de l'eau sur l'orthose où l'on obtient :



soit : Orthose + eau → kaolinite + solution de lessivage, et

- **en milieu équatorial** se dégage l'allitisation

A cette latitude, le climat est très chaud et très humide avec un couvert végétal important. Ce milieu permet la formation de gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui est un hydroxyde d'aluminium ; on parle d'allitisation. La formation de gibbsite s'accompagne par la perte totale de silice Si et de potassium K. Cette altération est également appelée latéritisation. La gibbsite montre alors une structure fibreuse (Figure 7) et est traduite par l'équation 3 suivante qui traduit l'action de l'eau sur l'orthose dans ce milieu :



Soit : Orthose + eau → gibbsite + solution de lessivage.

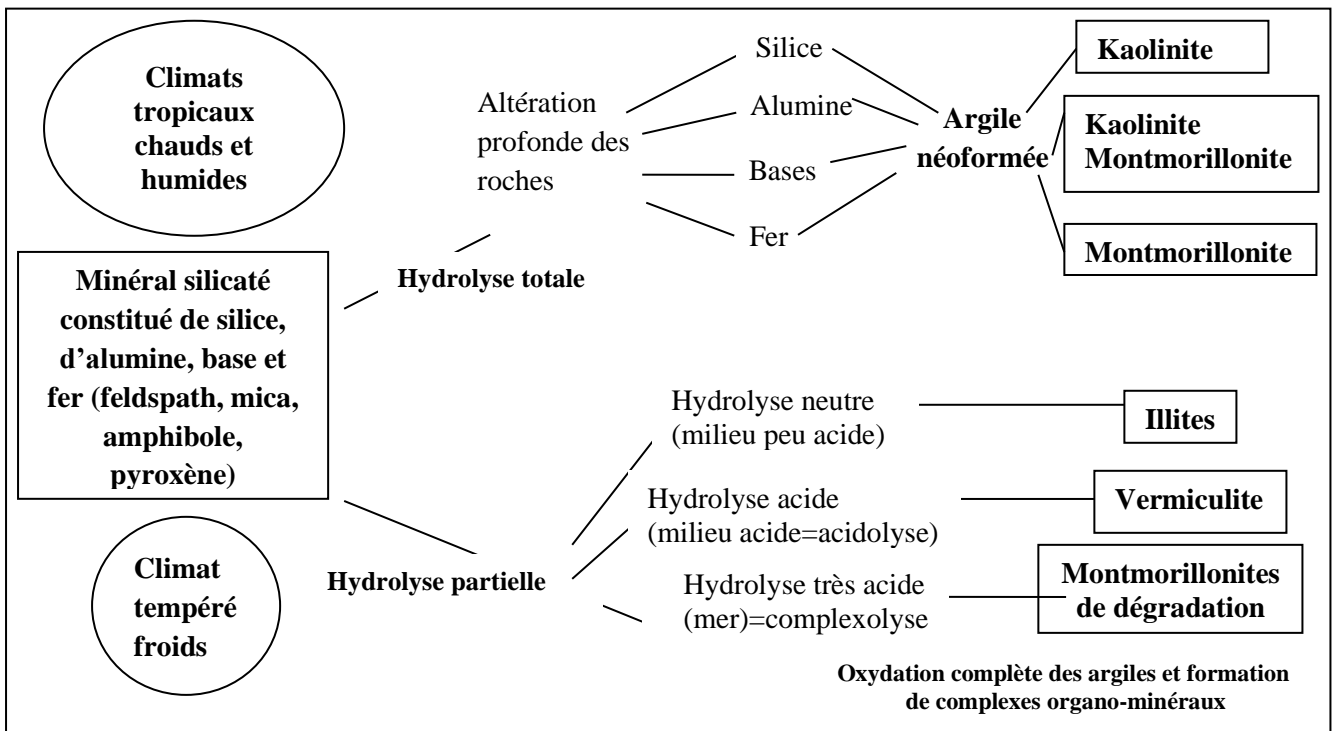


Figure 7 : Altération des minéraux et processus de formation des argiles (GRIM, 1953).

1) Structure des argiles

Dans la nature, les minéraux argileux sont généralement associés à d'autres minéraux. La présence de ces minéraux associés joue un rôle non négligeable dans les propriétés physico-chimiques des argiles.

Les principaux composants minéralogiques des argiles sont :

- les minéraux argileux (phyllosilicates) dominants ;
- le quartz jusqu'à 30% de la roche ;
- la calcédoine, opale (forme mal cristallisée et hydratée de la silice) d'origine organique (plantes, plancton) ;
- les oxydes et hydroxydes de fer : hématite, goethite ;
- le sulfure de fer (pyrite) en milieu réducteur ;
- la gibbsite (oxyde d'aluminium) sous climat chaud et humide ;
- les carbonates (calcite, dolomite) ;

2) Classification des argiles

La classification des argiles reste délicate car les espèces cristallines qui les constituent sont sujettes à des variations de composition dues à des nombreuses possibilités de substitution (CAILLERE *et al.*, 1982). Les principaux critères de classification des argiles sont basés sur les paramètres de combinaison des feuillets (DECARREAU, 1990). Cette combinaison de feuillet est de différents types tels que présentés comme suit :

- la combinaison de feuillets (de type T-O ou 1-1 ; de type T-O-T ou 2-1 ; de type T-O-T-O ou 2-1-1) ;
- le type de cation dans l'octaèdre ;
- la charge de la couche ;
- le type de matériel dans l'espace inter foliaire (cations et molécules d'eau,)

Les minéraux argileux sont des alumino-silicates plus ou moins hydratés. Ils appartiennent au groupe des phyllosilicates. Ils sont caractérisés par une faible granulométrie (inférieure à 2 μm) ; les feuillets constitutifs de la structure lamellaire sont formés par l'empilement de couches de tétraèdres siliceux et de couches d'octaèdres alumineux ou magnésiens.

Selon la combinaison de feuillets, six grandes familles se distinguent où les plus communes sont sur la figure 8 ci-après.

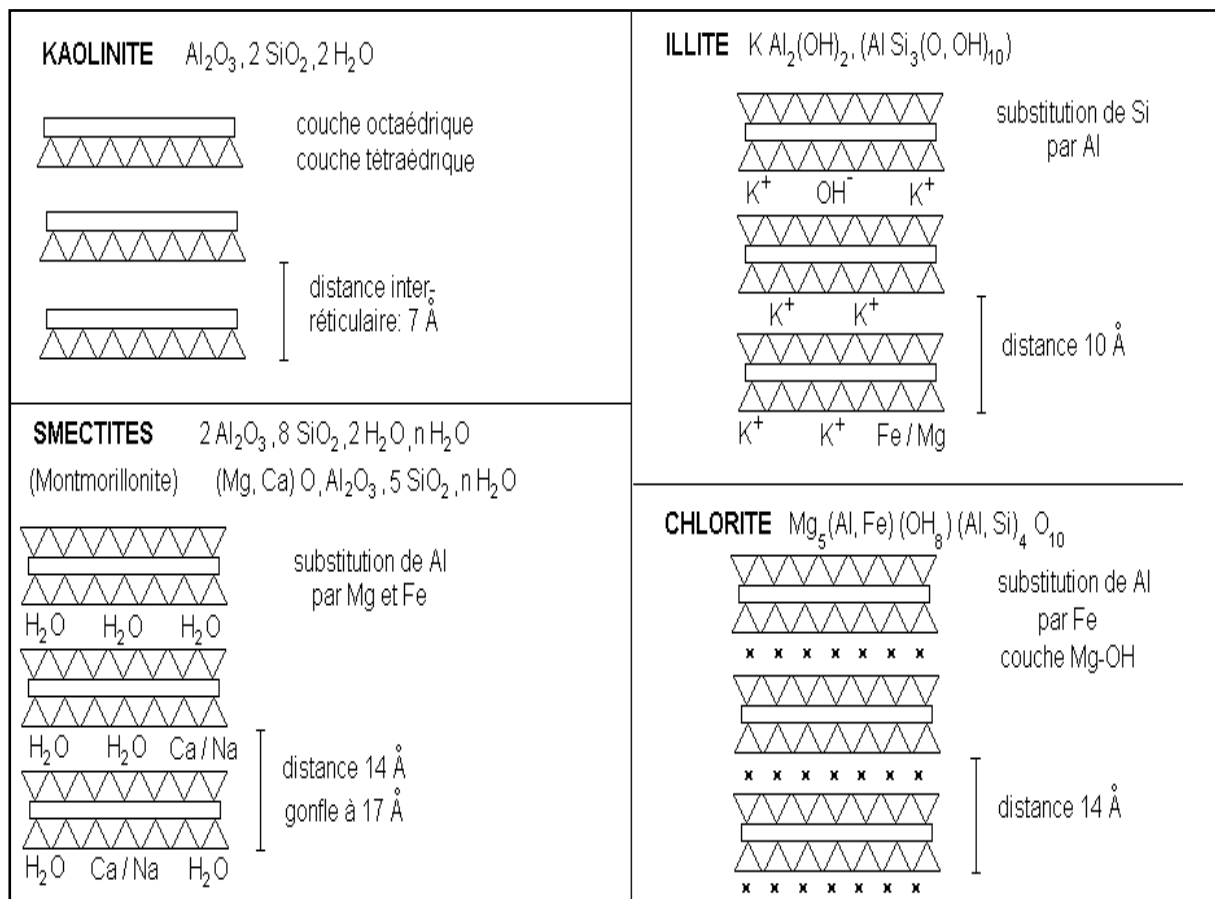


Figure 8 : Grandes familles des argiles (GRIM, 1953).

On a ainsi :

- **les minéraux de type 1-1 (0,7 nm)**

Ces minéraux sont constitués de feuillets comprenant une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres et dont la distance basale varie entre 0,71 et 0,73 nm. Ce groupe est aussi symbolisé par (T-O). A ce type, correspond le groupe de la Kaolinite (Figure 8) ci-dessus.

Le feuillet est électriquement neutre et l'espace inter-lamellaire est dépourvu d'espèces chimiques à l'exception de l'halloysite dont des molécules d'eau peuvent s'insérer dans l'espace inter feuillet.

Ceci explique le fait que la distance basale de ce minéral soit de 1 nm (KHATTAB, 2002). La cohésion des feuillets est assurée par des liaisons hydrogènes, relativement, fortes s'établissant entre les ions oxygènes d'un plan et les hydrogènes des groupements hydroxyles du plan qui succède (KHATTAB, 2002).

- les minéraux de type 2-1 (1 nm)

Le feuillet de ces minéraux est constitué de deux couches de tétraèdres siliceuses encadrant une couche d'octaèdres alumineuse. La distance basale varie entre 0,91 et 1,5 nm selon le contenu de l'inter-feuillet. Il est symbolisé par une liaison de type T-O-T.

A part le talc et la pyrophyllite, le feuillet élémentaire des minéraux de ce groupe porte une charge négative provenant des substitutions isomorphiques dans les interstices tétraédriques et/ou octaédriques.

Ces substitutions correspondent essentiellement au remplacement des ions Si^{4+} par des ions Al^{3+} et Fe^{3+} dans les tétraèdres et au remplacement des ions Al^{3+} par des ions Fe^{2+} , Mg^{2+} et Mn^{2+} (minéraux dioctaédriques) ou des ions Fe^{2+} et Mg^{2+} par des ions Li^+ (minéraux tri octaédriques) dans les octaèdres.

Les déficits de charge du feuillet liés à ces substitutions sont compensés par la présence de cation (exemple K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , ou Mg^{2+}) dans l'espace inter-foliaire.

Selon l'importance de ces substitutions et les propriétés qui en résultent (exemple le gonflement), il est possible de différencier les phyllosilicates 2-1. Lorsque le déficit de charge est nul, il n'y a pas de cation inter-foliaire (l'inter-feuillet est inexistant).

La distance basale est alors minimale et varie entre 0,91 et 0,94 nm. Il s'agit des cas de la pyrophyllite et du talc. Lorsque le déficit de charge est maximum compris entre 0,9 et 1,0 par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, le cation compensateur n'est pas hydraté et la distance basale varie entre 0,96 et 1,01 nm.

Le groupe ainsi défini est celui des micas (LOPEZ-LARA et *al.*, 2004). L'illite fait partie de ce groupe (Figure 8) précédent. Le potassium présent, unit intimement les feuillets par l'intermédiaire de fortes interactions électrostatiques assurant une grande stabilité de l'illite. Lorsque la charge inter-foliaire est comprise entre 0 et 0,9 par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, les cations inter-foliaires sont hydratés. La distance basale dépend alors de la charge et du nombre de modules d'eau associée à ces cations.

Cette distance peut varier de 1,43 nm pour les vermiculites ; charge comprise entre 0,60 et 0,90 par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ à 1,55 nm pour les smectites dont la charge varie entre 0,25 et 0,60 par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Figure 8) précédent. Les cations inter-foliaires des smectites, généralement le calcium Ca ou le sodium Na, peuvent être échangés par la mise en suspension dans les solutions salines.

Pour la vermiculite (charge du feuillet supérieure à 0,60 par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), les molécules d'eau formant la sphère de coordination des cations inter-foliaires sont fortement associées aux

feuillet par le biais des interactions de type ion-dipôle. De telles interactions limitent de façon notable les possibilités d'expansion du minéral (MILLOGO, 2008).

Quant aux smectites (charge du feuillet inférieure à 0,60 par $O_{10}(OH)_2$), elles sont caractérisées par une grande aptitude au gonflement du fait de faibles interactions assurant la liaison entre les feuillets.

- **et les minéraux de type 2-1-1 (1,4 nm)**

Ils sont constitués par une couche d'octaèdres encadrée par deux couches de tétraèdres et un inter-feuillet constitué par une couche d'octaèdres brucitique (MILLOGO, 2008). Leur équidistance basale est de 1,4 nm. Ils sont représentés par T-O-T-O. A ce type, correspond le groupe des chlorites (Figure 8) précédent. Les minéraux de ce groupe sont classés en deux sous-groupes selon la nature du feuillet 2-1 (KHATTAB, 2002) :

- les chlorites vraies, sont celles pour lesquels, le feuillet de type 2-1 est identique à celui d'un mica magnésien chargé négativement. Cette charge est neutralisée par la substitution d'un des ions magnésium Mg^{2+} par un ion aluminium Al^{3+} dans la couche brucitique. La liaison entre les feuillets de ces chlorites est assurée par les interactions électrostatiques entre le feuillet de type 2-1 et la couche brucitique. Les chlorites vraies ont une équidistance basale stable.

- les chlorites gonflantes (pseudo-chlorites) où le feuillet de type 2-1 sont semblables à celui d'une smectite. Elles sont gonflantes.

Les minéraux argileux sont classés généralement en deux sous-groupes : les minéraux dioctaédriques et les minéraux trioctaédriques.

Les minéraux dioctaédriques sont ceux dont les six valences négatives du site octaédrique sont composées par deux cations trivalents comme Al^{3+} ou Fe^{3+} .

Les minéraux trioctaédriques sont ceux dont les six valences négatives du site octaédrique sont compensées par trois cations divalents comme Fe^{2+} ou Mg^{2+} . L'on aboutit à la classification des phyllosilicates selon (Tableau V) suivant :

Tableau V : Classification des phyllosilicates (MILLOGO, 2008).

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèce	Formules chimiques
1 - 1	Kaolinite	Kaolinites	Dickite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			Nacrite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			Kaolinite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			Méthalloysite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			halloysite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$
	Serpentines	Antigorite	$Mg_5 Si_2 O_5(OH)_2$	
	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2 Si_4 O_{10}(OH)_2$
Talc		Talc	$Mg_3 Si_4 O_{10}(OH)_4$	
	Smectite	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(Al_{1,67}Mg_{0,55})O_{10}(OH)_2$
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$Mg_3 Si_{3,67} Al_{0,33} O_{10}(OH)_4$
2 - 1	Vermiculite	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(AlFe\dots)_2(SiAl)_4 O_{10}(OH)_2$
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(Mg,Fe\dots)_2(Si,Al)_4 O_{10}(OH)_2$
	Mica	Micas dioctaédriques	Muscovite	$KAl_2 (Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Mica trioctaédriques		Phlogopite	$KMg_3 (Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
2 - 1 - 1	Chlorite	Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$Al_4 (Si,Al)_4 O_{10}(OH)_8$
		Chlorite trioctaédriques	Espèces différentes	$(Mg,Fe\dots)_5(Si,Al)_4 O_{10}(OH)_8$

3) Propriétés physiques et chimiques des argiles

Les propriétés physiques et chimiques des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure des feuillets et à la charge des particules.

La surface spécifique (As) et la capacité d'échange cationique (CEC)

La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules (MILLOGO, 2008). La surface des argiles est supérieure à celles de minéraux de même taille mais de forme différente.

Les propriétés des argiles sont essentiellement contrôlées par leur surface. La surface totale comprend la surface externe qui est comprise entre les particules argileuses et la surface interne correspondant à l'espace inter-foliaire.

Les minéraux fibreux sont caractérisés par une grande surface spécifique (A_s). La Capacité d'Echange Cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle mesure la concentration en cations non fixés dans la couche diffuse et dépend de la charge totale (c'est-à-dire la charge de surface et de structure).

La CEC est fonction du pH. Elle est généralement donnée pour un pH neutre (pH=7). Elle est exprimée en milliéquivalent/100g ($m_{\text{éq}}/100g$). Le (Tableau VI) donne des valeurs de surface spécifiques de minéraux argileux (MOREL et *al.*, 2007)

Tableau VI : Surfaces spécifiques et Capacité d'Echange Cationique de minéraux argileux (MOREL et *al.*, 2007)

Minéral	Surface interne (m^2/g)	Surface externe (m^2/g)	Surface total (m^2/g)	CEC ($m_{\text{éq}}/100g$)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	25-40
Smectite	600-700	80	700-800	80-120
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100-175	100-175	5-15

Selon MILLOGO, (2008), les argiles gonflantes (smectites, vermiculites et pseudo-chlorites) peuvent être facilement traitées par les liants hydrauliques à cause de leur forte Capacité d'Echange Cationique (CEC).

En effet, les réactions d'échange cationique font partie des réactions primordiales dans le processus de traitement des sols à la chaux et au ciment.

CONCLUSION PARTIELLE

L'on a souligné le niveau de connaissance en construction routière : il comprend un examen des travaux antérieurs qui ont montré que l'ajout de stabilisants (tels que la chaux et/ou le ciment), en proportion, améliore la caractérisation physique et mécanique des sols de mauvaise tenue. Ce chapitre, a permis aussi de déterminer la composition d'une structure routière, composée : d'une couche de plate-forme (sol support plus couche de forme), d'une

couche d'assise (couche de fondation plus couche de base) au-dessus de la couche de plate-forme et d'une couche de surface (couche de liaison plus couche de roulement) qui repose sur la couche d'assise.

De même, l'on a fait l'état de connaissance des paramètres de conception (trafic, portance, nature des sols, ...) de la structure de chaussée et de la matière première nécessaire à son élaboration tels les sols argileux.

La connaissance ou la caractérisation des sols argileux conduit à la détermination de la composition minéralogique et la classification de ceux-ci.

Il ressort, qu'il existe trois sous-classes des sables que sont : les sables fins, les sables moyens et les sables grossiers.

Par ailleurs, l'on distingue six groupes d'argile qui sont : les kaolinites, les talcs, les smectites, les vermiculites, les micas et les chlorites.

CHAPITRE II. MELANGES LIANTS HYDRAULIQUES (CHAUX-CIMENT) - SOL ARGILEUX : REACTIONS CHIMIQUES, PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES

C'est un chapitre qui s'articule autour des réactions argile-chaux, réactions physico-chimiques du ciment et de leur influence sur les propriétés géotechniques et mécaniques des matières premières.

II.1. RAPPELS

Le mélange de la chaux à un sol de mauvaise tenue afin de l'améliorer pour une utilisation en construction infrastructurelle est une technique ancienne (YOUCEF et *al.*, 2018).

Les routes en terres traitées à la chaux étaient pratiquées par les Egyptiens, les Grecs et les Romains qui utilisaient des mélanges sols et chaux (DIVET et *al.*, 1998). Aux USA, le mélange chaux et sols pour réaliser des routes a été pratiqué pour la première fois en 1920 (VIALLISSE-TERRISSE, 2000).

La chaux éteinte, quant à elle, avait été employée comme liant dans les constructions modernes dès l'année 1924 pour des routes pas longues, puis l'on a poursuivi cette technique pendant la deuxième guerre mondiale pour construire les routes et les pistes d'atterrissage des avions (DIVET et *al.*, 1998).

Le traitement des sols argileux avec le mélange de liant dans le but de les améliorer pour leur emploi en construction routière est beaucoup pratiqué dans le monde. Il est utilisé pour l'amélioration des sols dans les couches d'assise de chaussées et pour la construction des voies ferrées et des pistes d'atterrissage des avions. Au monde, c'est cinq cent millions de mètres carrés de surface de routes qui étaient traitées et améliorées à la chaux et c'est une technique employée en construction des ouvrages hydrauliques (HERRIER et *al.*, 2015).

II.2. CARACTERISTIQUES DE LA CHAUX ET DU CIMENT

Les produits de traitement des sols sont portés sur les stabilisants au nombre desquels on peut citer : la chaux selon la normalisation EN 459-1 (2015) et/ou les ciments.

- la chaux est un produit composé majoritairement d'oxyde de calcium CaO, de portlandite Ca(OH)₂ et de carbonate de magnésium hydraté MgCO₃.

- le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit suite aux réactions et processus d'hydratation. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (VIALLISSE-TERRISSE, 2000 ; WESTSHONDO, 2012).

On distingue : les Ciments Portland Artificiel (CPA ou CEM I), les Ciments Portland Composé (CPO ou CPJ ou CEM III) (CODINORM, 2015) et les ciments de haut fourneau (CHF ou CEM III) (CODINORM, 2015) ; puis les ciments de laitier au clinker CLK ou CEM IIIe qui contiennent une proportion importante de clinker et/ou de laitier auxquels on additionne en proportion moindre du filer et des adjuvants (CODINORM, 2015).

Les Ciments Portland contiennent du silicate de tricalcium (C_3S), du silicate de dicalcium (C_2S), de l'aluminat de tricalcium (C_3A) et de l'aluminoferrite de tétracalcium (C_4AF). En chimie cimentaire : C = Ca ; S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 et F = Fe_2O_3 .

Les ciments sont classés suivant leurs résistances. Ainsi, la normalisation ivoirienne définit trois classes de ciment en fonction des résistances minimales garantie en compression sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours d'âge après conservation dans l'eau à $27^\circ C \pm 2^\circ C$ mesurées selon la Norme Ivoirienne (CODINORM, 2015).

On distingue :

- la classe 35

Ce sont les ciments dont la résistance suivant la Norme ivoirienne est de 35 Méga Pascal (MPa). Ils sont commercialisés sous l'appellation de ciment CPA 350 et CPO 350.

- la classe 32,5

la résistance est de 32,5 MPa. Dans cette catégorie on a le ciment CPJ 32,5.

- la classe 42,5 ;

pour ce cas, on a le ciment CPJ 42,5.

On note parfois des sous classes avec l'annotation « R » pour prise rapide. Exemple ciment 32,5 R.

II.3. REACTIONS ARGILE - CHAUX

Ajouter de la chaux à un sol argileux ou latéritique déclenche quatre principales réactions que sont :

- l'échange cationique,
- la floculation-agglomération,
- la réaction de carbonatation,
- la réaction pouzzolanique.

Ces réactions argile-chaux sont décrites comme suit :

II.3.1. ECHANGE CATIONIQUE

Ajouter de la chaux à un sol a un effet immédiat sur les propriétés de celui-ci. Il y a libération des ions Ca^{2+} produits par la chaux en présence d'eau, et ceci s'accompagne d'une élévation du Potentiel Hydrogène (pH) du sol.

Il se produit un échange cationique entre les ions métalliques liés aux surfaces des particules argileuses du sol et les ions Ca^{2+} produits par la chaux (BASHA *et al.*, 2005). La valeur et la taille de l'ion jouent un rôle primordial dans cette réaction d'échange cationique. Les cations de valence forte remplacent facilement ceux de valence faible.

Pour des cations de même valence, le plus gros peut être facilement remplacé. On peut donc dresser une liste des cations par ordre approximatif de capacité de remplacement. Cet ordre dans la réalité dépend du type d'argile, de la nature des cations à remplacer et de la concentration des ions dans l'eau.

L'ordre croissant de capacité de remplacement des cations est le suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$ (AL-RAWAS, 1998).

La réaction d'échange cationique est responsable de la baisse de plasticité des sols quand ils sont traités à la chaux. Elle a peu d'influence sur les sols riches en kaolinite compte tenu du fait que la kaolinite ne dispose pas d'inter-feuillet où les cations pourraient s'incruster.

Par contre, pour des sols riches en smectites (exemple la montmorillonite), la réaction d'échange cationique participe efficacement à la baisse de leur plasticité.

II.3.2. FLOCCULATION-AGGLOMERATION

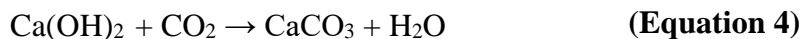
Après la réaction d'échange cationique, les particules argileuses se trouvent entourées par une double couche diffuse qui peut être modifiée par l'échange ionique du calcium. Cela altère la densité de la charge électrique autour des particules argileuses qui s'attirent et se regroupent et forment des flocons : C'est le processus de la floculation (DIVET, 1998).

Ce processus peut modifier l'agencement des particules argileuses pour aboutir à la formation de particules de plus grandes tailles. Il s'en suit une réduction de la plasticité et une augmentation de la portance du sol argileux. Le reste des particules du sol qui portent toujours des charges négatives vont s'attirer avec celles ayant une surface chargée positivement, c'est l'agglomération ou union en une masse des particules. Elle est effectuée par l'échange cationique ou la floculation des particules.

II.3.3. CARBONATATION

Il s'agit de la réaction entre la chaux et le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air qui conduit à la formation de la calcite qui se présente sous forme de cristaux de calcite CaCO₃.

La réaction chimique qui en découle est définie par l'équation 4 suivante qui est :



Les cristaux de calcite formés sont des colles c'est-à-dire des liants de cimentation très fragiles et par conséquent connectent faiblement les particules du sol argileux.

Ces cristaux renforcent seulement à court terme le sol. La réaction qui consomme une partie de la chaux destinée à la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux, retarde celle-ci et contribue à la baisse du pH des sols traités (MOOR, 1987 ; RONALD, 1979).

PAIGE-GREEN (1984) a montré que le dioxyde de carbone présent, développe, au début de la réaction, une résistance mécanique qui diminue avec le temps de cure dans l'eau.

II.3.4. REACTION POUZZOLANIQUE

La chaux ou oxyde de calcium CaO, l'eau H₂O, la silice Si et l'alumine Al₂O₃ réagissent pour donner divers composés de cimentation.

La silice et l'alumine peuvent provenir des minéraux argileux, du quartz, des feldspaths, des micas, des minéraux aluminosilicates et même de certains composés amorphes (THOMPSON, 1966).

Le mélange d'une quantité importante de chaux à un sol fait accroître de manière significative le pH du mélange jusqu'à 12,4 ; valeur qui correspond au pH d'une solution saturée de chaux. Les solubilités de la silice Si et de l'alumine Al₂O₃ croissent, donc, avec ces valeurs de pH élevées. Divers mécanismes de formation des produits de la réaction entre la silice ou l'alumine avec la chaux ont été proposés par des chercheurs. C'est dans ce sens que : EADES (1962) rapporte que la valeur élevée de pH est à l'origine de la dissolution de la silice des minéraux argileux. Cette silice dissoute se combine aux ions Ca²⁺ libérés par la chaux pour produire du silicate de calcium CaSiO₃. Cette réaction peut se poursuivre tant qu'il existe de la chaux éteinte et de la silice des minéraux argileux.

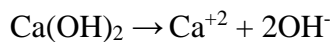
DIAMOND et *al.* (1964) ont suggéré que les molécules de la chaux sont adsorbées, c'est-à-dire fixées, par les surfaces des argiles et réagissent avec d'autres surfaces argileuses pour faire précipiter les produits de la réaction.

De ce fait, les minéraux argileux aux grandes surfaces spécifiques comme les smectites sont très réactives vis-à-vis de la chaux.

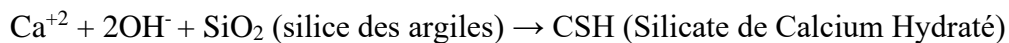
Pour STOCKER (1972), la chaux réagit directement avec les minéraux argileux par l'attaque des feuillets sur leurs bords qui sont en contact avec l'eau pour donner du matériau de type ciment.

Des recherches menées concernant l'adsorption de la chaux par la kaolinite et la montmorillonite (TIZIANO et *al.*, 2006), ainsi que des études optiques des systèmes argiles-chaux-eau indiquent que les réactions chimiques en surface sont bien possibles et les nouvelles phases peuvent se former directement sur les surfaces des particules argileuses (ORMSBY (1966)). Les principales réactions chimiques peuvent être schématisées comme suit :

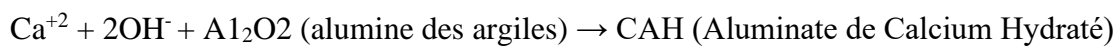
- dissolution de la chaux :



- hydratation de la chaux :



- hydratation de l'aluminate de calcium :



Une large variété d'hydrates peut être obtenue en fonction des conditions des réactions chimiques. Ces conditions sont principalement : la quantité et le type de chaux, les caractéristiques du sol, le temps de cure dans l'eau et la température. Les réactions typiques entre le sol et la chaux sont les suivantes :

- kaolinite + chaux \rightarrow CSH (C/S = 0,2-1) + CASH \rightarrow CSH (MOH, 1965)
- kaolinite + chaux \rightarrow CASH (prehnite) (SLOANE, 1965)
- montmorillonite + chaux \rightarrow CSH (I)(gel) + C₄AH₁₃ (hydrogarnet) (WANG, 1966)
- montmorillonite + chaux \rightarrow CSH (gel) \rightarrow CSH (II) (RUFF et *al.*, 1966),

Où : C = CaO ; S = SiO₂ ; A = Al₂O₃ et H = H₂O.

Pour CSH (I) et CSH (II), les ratios des inter stratifiés Chlorite/Smectite (C/S) sont respectivement inférieurs et supérieurs à 1,2 (YU et *al.*, 1999).

Les propriétés et les caractéristiques du sol qui influencent les réactions pouzzolaniques sont : le pH, le taux de matière organique, le drainage naturel, la présence d'une quantité excessive de sodium échangeable, la minéralogie de l'argile, le degré d'altération, la présence des sulfates et carbonates, le fer extractible, le rapport silice/sesquioxydes et le rapport silice/alumine (ATTOH-OKINE, 1995).

II.4. REACTIONS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui forme une pâte au contact avec l'eau et fait prise en durcissant par suite du processus d'hydratation. Après le durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (DJOMO, 2017).

Le ciment Portland est l'une des nombreuses variétés de ciment utilisé dans le traitement des sols. La composition typique de son clinker est au maximum : 68,1% d'oxyde de calcium CaO ; 24,3% de dioxyde de silicium SiO₂ ; 7,1% d'oxyde d'aluminium Al₂O₃ ; 5,7% d'oxyde de fer (III) Fe₂O₃ et 3% d'autres composés et contient 4 phases majoritaires que sont : l'alite (3CaO.SiO₂ ou C₃S), la bélite (2CaO.SiO₂ ou C₂S), la célite qui est le mélange de l'aluminate de calcium (3CaO.Al₂O₃ ou C₃A) et du Ferroaluminate de calcium (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C₄AF) (VIALLISSÉ-TERRISSE, 2000).

II.5. INFLUENCES DES LIANTS HYDRAULIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS GEOTECHNIQUES ET MÉCANIQUES DES SOLS

La chaux et le ciment sont des liants hydrauliques qui participent en général à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des éléments minéraux (MILLOGO, 2008).

Pour la chaux, c'est l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, produit de l'hydratation de la chaux vive CaO qui réagit avec les minéraux argileux et la silice fine SiO₂ ; ceci est responsable de la modification des propriétés géotechniques et mécaniques des matériaux.

Le ciment participe aussi à l'amélioration desdites propriétés par un mécanisme d'union des particules du sol par les Silicates de Calcium Hydratés (CSH) produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuses du sol.

L'importance des effets des liants est liée, surtout, à la granulométrie et à la minéralogie de la matière première (sol naturel remanié) traitée (MILLOGO, 2008).

II.5.1. INFLUENCE DES LIANTS SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DU SOL

II.5.1.1. Granulométrie du sol

Mélanger de la chaux et/ou du ciment à un sol argileux ou latéritique crée une agglomération de ses particules, ce qui participe à une augmentation de leurs tailles pour atteindre celles des limons et des sables, et par conséquent, fait diminuer la fraction argileuse (OSULA, 1996 ; NARASIMBA *et al.*, 1996).

Ce phénomène est dû aux réactions d'échange cationique responsables de la floculation-agglomération des particules argileuses et aussi aux réactions pouzzolaniques qui impliquent les minéraux argileux. La diminution de la fraction argileuse pour une même quantité de chaux et de ciment est plus importante pour la chaux par rapport au ciment (OSULA, 1996).

II.5.1.2. Consistance du sol

La consistance d'un sol est définie par les limites d'Atterberg et par la valeur au bleu de méthylène. La consistance d'un sol change immédiatement après le mélange de la chaux ou du ciment sur ce sol.

L'effet de la chaux sur les sols argileux ou latéritiques est plus ressenti sur les limites d'Atterberg que celui du ciment (OSULA, 1996).

Cette modification immédiate est due aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation-agglomération des particules argileuses.

Le mélange ou l'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux s'accompagne d'une baisse de la Limite de Liquidité (WL), d'une augmentation de la Limite de Plasticité (WP) et par conséquent d'une baisse de l'Indice de Plasticité (KHATTAB, 2002 ; BELL, 1996 ; ATTOH-OKINE, 1990).

Cependant, pour un sol limoneux, les phénomènes sont inverses pour la limite de liquidité et limite de plasticité (BRANDLE, 1981).

II.5.1.3. Teneur en eau optimale et densité sèche maximale

Additionner de la chaux et/ou du ciment à un sol argileux ou latéritique fait croître la teneur en eau optimale et dans le même temps fait décroître la densité sèche maximale (KHATTAB, 2002 ; ATTOH-OKINE, 1990 ; MESSOU, 1980).

Cette augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte demande en eau après le mélange de ces liants en vue de dissocier l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour produire des ions calciums Ca^{2+} utiles pour les réactions d'échange cationique et pouzzolanique. La

diminution de la densité sèche maximale d'un sol par le mélange de la chaux s'explique de deux manières qui sont :

- le mélange de la chaux à un sol provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes,
- la densité absolue de la chaux est généralement inférieure à celle des sols. De ce fait, l'effet de la chaux sur ces paramètres est plus ressenti, à court terme, par rapport à celui du ciment (OSULA, 1996).

II.5.2. INFLUENCE DES LIANTS SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DU SOL

Le mélange de la chaux et/ou du ciment à un sol argileux ou latéritique améliore les caractérisations mécaniques dont principalement la portance CBR, les résistances à la compression, à la flexion et à la traction par fendage (Essai Brésilien) de ce sol (KHATTAB, 2002 ; BASHA *et al.*, 2005 ; OSULA, 1996). L'amélioration de ces propriétés mécaniques est due aux réactions d'hydratation du ciment produisant des silicates de calcium hydraté CSH qui lient les particules du sol entre elles d'une part, et, d'autre part, par les réactions pouzzolaniques entre les minéraux argileux et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ces paramètres s'améliorent avec le temps compte tenu de la consolidation du CSH avec le temps de cure dans l'eau.

La portance CBR à trois jours de cure à l'air puis à quatre jours d'immersion dans l'eau est en général supérieure à celle après quatre jours d'immersion directe (BAGARRE, 1990 ; MESSOU, 1980). Les auteurs font constater que le traitement de sols aux liants accroît la résistance à la compression simple (R_c) qui de 0,45 MPa à 28 jours de cure peut atteindre 0,50 MPa à 360 jours de cure dans l'eau pour un taux de 2% de chaux (ABDO, 2008 ; SAUSSAYE, 2012). Le traitement améliore aussi la résistance à la traction (R_t) et le module de Young (E) à différents âges de cure dans l'eau. Ainsi, 3% de taux de liants hydrauliques pour un sol de classe A permet de créer des contraintes de traction à 28 jours de 0,16 MPa et à 90 jours de 0,28 MPa avec des modules de Young respectifs de 3 897 MPa et 5 301 MPa.

CHAPITRE III. NORMES DE RECONNAISSANCE ET D'ESSAI GEOTECHNIQUE

Les essais géotechniques routiers sont réglementés par plusieurs normes qui se basent essentiellement sur des paramètres mécaniques pour apprécier la conformité d'emploi d'un matériau en construction infrastructurelle. Ces normes concernent les prélèvements et l'identification des sols, l'essai d'aptitude et de formulation des traitements de sols et les essais mécaniques des sols traités.

III.1. ESSAIS DE PRELEVEMENT ET D'IDENTIFICATION DES SOLS

Le tableau VII ci-dessous présente la norme régissant les prélèvements et l'identification des sols. Il s'agit des prélèvements de la matière première sur les sites d'emprunt, son transport et son conditionnement au laboratoire pour qu'il soit représentatif. Des essais d'analyse granulométrique pour la répartition des grains d'un sol remanié. Egalement, l'on a les essais de limite d'Atterberg caractérisant la plasticité d'un sol et sa consistance et celui du bleu de méthylène qui définissent l'argilosité d'un sol.

Tableau VII : Normes d'essais prélèvement et identification des sols, (MAGNAN et *al.*, 2015).

XP P 94-202	Roches – Prélèvements des sols et des roches – Méthodologies et procédures
XP P-011	Sols : Reconnaissance et Essais – Description – Identification Dénomination des sols – Terminologie – Éléments de classification.
NF P 94-093	Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.
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.
NF EN 933-9	Sols : Reconnaissance et Essais – Essai au bleu de méthylène
NF P 94-051	Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
NF P 94-056	Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.
NF P 94-057	Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols Méthode par sédimentation.

III.2. ESSAIS D'APTITUDE ET DE MELANGES DES TRAITEMENTS DE SOLS

Le tableau VIII ci- après présente les normes de l'essai d'aptitude au traitement des sols et à la mise en œuvre des mélanges ou de formulation en laboratoire.

Tableau VIII : Normes d'essais d'aptitude et de formulation au traitement de sols.
(MAGNAN *et al.*, 2015).

NF P 94-100	Sols : Reconnaissance et Essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.
NF P 94-102-2	Sols : Reconnaissance et essais – Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme – Partie 2 : Méthodologie des études de formulation en laboratoire. NB : 2ème tirage octobre 2001.
XP P 94-090-1	Sols : Reconnaissance et Essais - Essai œdométrique - Partie 1 : Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.
NF P 98-114-3	Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques- Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux.

III.3. ESSAIS MECANQUES DES SOLS TRAITES

Le tableau IX, ci-dessous, présente les essais mécaniques des sols traités qui sont régis par des principes qui permettent une meilleure application. En effet, ces normes concernent les essais de traction, de compression ainsi que ceux des modules de déformation puis le coefficient de poisson d'un sol traité ou non traité.

Tableau IX : Normes d'essais mécaniques des sols traités. (MAGNAN *et al.*, 2015).

NF EN 13286-49	Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique
NF P98-232-2	Essais relatifs aux chaussées - Détermination des caractérisations mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques - Essais de traction directe sur graves et sables.
NF P18-406	Bétons - Essai de compression
NF P98-232-1	Essais relatifs aux chaussées - Détermination des caractérisations mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1 : essai de compression simple sur graves
NF P98-115	Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées - Constituants - Composition des mélanges et formulation - Exécution et contrôle

CONCLUSION PARTIELLE

Il est fait la synthèse bibliographique composée de généralités présentant l'état des connaissances sur la construction routière ainsi que les caractérisations chimiques, géotechniques et mécaniques des mélanges (liants hydrauliques et sol).

Ce chapitre consacré aux mélanges liants hydrauliques (chaux et ciment) et sols argileux, il est admis, généralement, qu'à travers l'ajout ou le mélange de la chaux et/ou le ciment à un sol argileux ou latéritique améliore les caractérisations mécaniques dont principalement la portance CBR, les résistances à la compression, à la flexion et à la traction par fendage (Essai Brésilien) de ce sol.

L'amélioration de ces propriétés mécaniques est due aux réactions d'hydratation du ciment produisant des Silicates de Calcium Hydratés CSH qui lient, d'une part, les particules des sols entre elles et d'autre part, par les réactions pouzzolaniques entre les minéraux argileux et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 quand des proportions limites sont définies dans le mélange. L'on fait constater que les ions sulfates SO_4^{2-} sont connus pour être des éléments qui perturbent la prise du ciment et créent des pathologies dans les matériaux des ouvrages de construction infrastructurelle.

L'on fait aussi remarquer que les paramètres de compacité, de portance et de résistances mécaniques deviennent acceptables avec le temps d'hydratation grâce à la consolidation du CSH avec la durée de cure, en développant des modules de Young croissant de 28 à 90 et 360 jours.

Enrichi, de ce constat, et pour répondre aux problèmes des dégradations récurrentes des sables argileux, serait-il nécessaire de traiter les sols remaniés de la région géotechnique R1 du sud de la Côte d'Ivoire, aux fins de comprendre leur comportement face aux mélanges liants hydrauliques à des proportions diverses, en vue de leur utilisation en assises de chaussée ? L'on évoluera dans un cadre normatif de qualité dans le prélèvement de la matière première (sol argileux) sur les sites d'emprunt, le transport, le conditionnement au laboratoire ainsi que les méthodes expérimentales avec des modes opératoires requis pour atteindre les objectifs spécifiques de cette étude.

**DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES
EXPERIMENTALES**

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV. MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DE DONNEES

L'on présentera les différentes techniques mises en œuvre pour identifier et caractériser les sols remaniés qui font l'objet de cette étude, suivant des normes de qualité, avec des modes opératoires référencés.

IV.1. MATIERE PREMIERE

Des sols remaniés font l'objet de cette étude. Ils ont été tous prélevés selon la norme XP P 94-202 (1995), sur des sites préalablement identifiés par le LBTP, en Onshore dans le bassin sédimentaire, situé dans la partie sud de la Côte d'Ivoire en région géotechnique R1 selon le LPTP, (1977). En effet, cette partie du pays, du point de vue géologique, est caractérisée par trois structures majeures que sont : la faille des lagunes, la ride Ghana-Côte d'Ivoire et le trou sans fond (AKA, 1991 ; in ASSALE, 2013). La faille des lagunes divise en deux zones distinctes le bassin sédimentaire que représentent : une zone sud constituée de plaine littorale basse et de bas plateaux où on trouve un cordon sableux puis une zone nord dite des hauts plateaux entre 50 et 110 mètres d'altitude. Cette zone nord, par excellence, est là où se localisent les sols fins en l'occurrence les sols argileux (KOUAKOU, 2005). Ainsi, elle s'identifie à la région géotechnique (R1) suivant la carte des régions (Figure 5) établie par le LBTP (1977). Il s'agit, notamment, des sols remaniés prélevés dans plusieurs gisements d'emprunt avec un point focal autour duquel gravitent trois autres points de prélèvement dans un rayon de 2-3 m repartis sur les sites de Bingerville, Songon, Samo et Grand-Lahou. Soit au total (quatre) points de prélèvement ayant les localisations établies avec le récepteur GPS ci-après et présentées dans le tableau X.

Tableau X : Localisation des sites de prélèvement de la matière première (coordonnées géographiques et UTN)

Longitudes (° ' ")	Latitudes (° ' ")	Altitudes (m)	Localités
3°53'42''32 W 400 612 m	5°21'32''38 N 400 612 m	46,5	Bingerville
4°12'25''19 W 366 954 m	5°19'07''77 N 400 612 m	25,6	Songon
3°30'53''88 W 442 939 m	5°17'28''19 N 400 612 m	51,4	Samo
5°00'07''49 W 278 102 m	5°14'57''11 N 400 612 m	23,3	Grand-Lahou

Ces échantillons ont été prélevés à des profondeurs variables allant de 1 à 5 m, en moyenne, sur des largeurs moyennes de 3 à 5 m. Ils ont été placés dans des sachets plastiques transparents essentiellement, d'abord, à la température ambiante, transportés et conditionnés au laboratoire autour de 25°C. Les sites d'échantillonnage ou d'emprunt sont représentés sur la figure 9 ci-dessous.

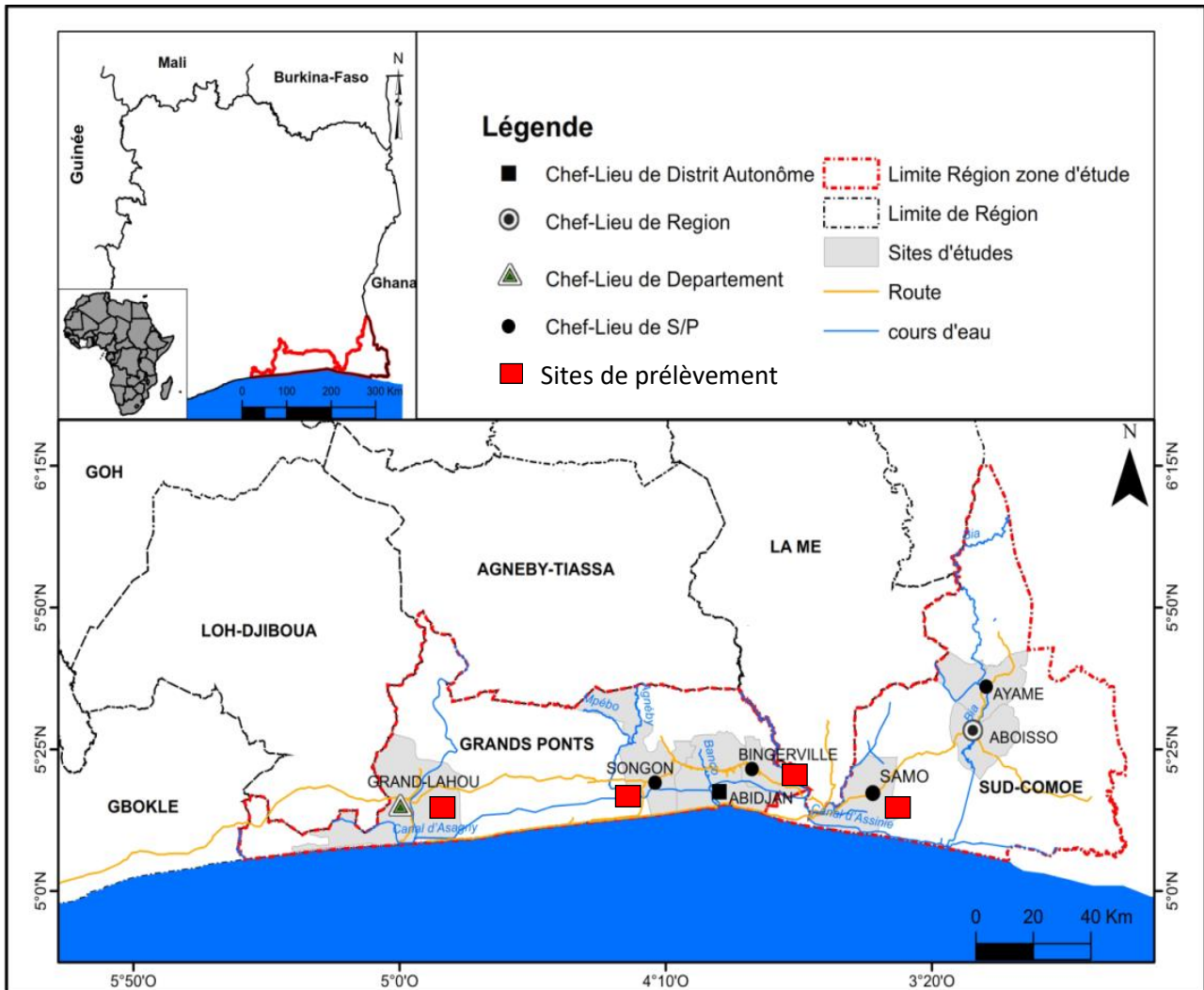


Figure 9 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons de sols remaniés.

La chaux vive pour l'amélioration des sols est une chaux commerciale fabriquée à Saint-Astier (France) selon la norme EN 459-1 (2015). Ce produit est composé majoritairement de chaux vive CaO , de portlandite Ca(OH)_2 et de carbonate de magnésium hydraté. La fiche technique de la chaux utilisée montre qu'elle est constituée de 64,5% de CaO et 35,5% de Ca(OH)_2 ainsi que de résidus insolubles. Sa masse volumique absolue varie de 2200 kg/m^3 à 2500 kg/m^3 . Les éprouvettes de sols après compactage sont hermétiquement fermées pendant

la cure afin d'éviter toute contamination par l'humidité de l'air. Elles sont, ensuite, conservées dans une salle à température maintenue constante à 25°C.

Dans le cadre de nos travaux, l'on utilisera le **ciment Portland** référencé CPJ-CEM II en provenance de la Côte d'Ivoire, de classe vraie 32,5 MPa. La composition de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ et 3% d'autres composés. Il est constitué de 4 phases majoritaires qui sont l'alite (3CaO.SiO₂ ou C3S), la bélite (2CaO.SiO₂ ou C2S), la célite (3CaO.Al₂O₃ ou C3A) et du ferroatluminat de calcium (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C4AF). **L'eau de gâchage** sera celle préconisée par la norme NF P 98-100 (2016) dépourvue de Matière Organique (MO).

IV.2. MATERIEL D'ACQUISITION ET D'EXPLOITATION DE DONNEES.

La Figure 10 ci-après présente le matériel utilisé pour le prélèvement des échantillons. Il est constitué :

- d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*) de type Garmin avec une précision de ± 3 m (Figure 10A) ci-après utilisé pour le positionnement des sites d'échantillonnage.
- d'une tarière, de pelles et de pioche pour les fouilles en rigole et/ou en excavation.

La Figure 11 suivante, présente le matériel utilisé au laboratoire. Ce sont :

- une étuve de marque (FRIOCELL) pour le séchage des sols ;
- une balance électronique de précision $\pm 0,1$ de marque Sartorius BI 1500 S pour peser les échantillons avant le tamisage ;
- une tamiseuse vibrante à colonne de 16 tamis de type AFNOR pour le tamisage des échantillons ;
- un moule CBR avec module Proctor pour des essais de densité et de portance de laboratoire..



A) Un récepteur GPS



B) Une pelle et une pioche



C) Une tarière

Figure 10 : Matériel de prélèvement des échantillons de matière première (GREHOA, 2016).



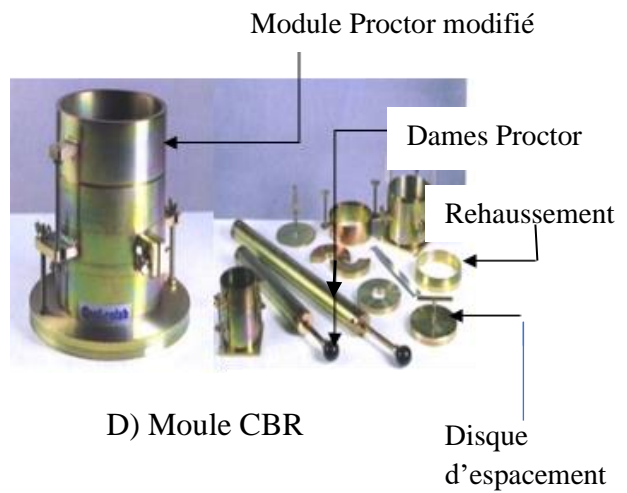
A) Une étuve



B) Une balance électronique (Sartorius BL 1500)



C) Tamiseuse vibrante



D) Moule CBR

Figure 11 : Matériel de laboratoire (GREHOA, 2016)

IV.3. METHODES EXPERIMENTALES

IV.3.1. ESSAI D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE

IV.3.1.1. Analyse granulométrique et sédimentométrie de la matière première

Pour bien décrire et identifier la matière première sol, il faut, donc, connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules constitutives en rapport leurs diamètres équivalents.

Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols (GUETTOUCHE, 2016), il s'agit de :

- l'analyse granulométrique par tamisage à sec ;
- l'analyse granulométrique par sédimentation ou de sédimentométrie.

Pour le premier essai, il s'agit de faire passer un échantillon d'emprunt représentatif du sol à travers des tamis superposés dont les diamètres d'ouverture vont en décroissant du haut vers le bas. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis de diamètres les plus hauts pour donner les refus ou retenus, tandis que les particules, les plus, fines se dirigent vers les tamis de diamètres inférieurs et constituent les passants. Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale initiale de l'échantillon prélevé en laboratoire, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulatif de passant. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique utilisant en ordonnée (Y) une échelle arithmétique variant de 0 à 100% et en abscisse (X) des modules exprimés dans une échelle logarithmique décimal pour de petites valeurs étalées entre $0,2 \cdot 10^{-6}$ mètres à 2 mètres où ils construisent une courbe granulométrique ci-après (figure 12). L'essai d'analyse granulométrique par tamisage ou la répartition des grains des échantillons prélevés de sol au laboratoire selon leurs diamètres a été effectué selon la Norme Française NF P 94-056 (1996) qui définit le mode opératoire pour exécuter cette analyse.

Pour le deuxième essai, afin d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile (particules fins), on procède à une analyse granulométrique par sédimentation. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules. À partir de la loi de Stokes exprimée par l'équation 5 ci- après, on détermine la taille des grains fins. Autrement dit, la méthode est applicable aux

suspensions de faible concentration, qui donne la valeur limite de la vitesse de décantation de particules sphériques en suspension dans un liquide au repos en fonction de leur diamètre. L'essai de sédimentométrie a été réalisé selon la Norme Française NF P 94-057 (1992) qui fixe le processus d'exécution de l'analyse. L'intérêt de cet essai réside également dans la détermination de la quantité d'argile (pourcentage de passants à 2 µm) pour les particules fines et très fines d'un sol ayant des formes irrégulières (disques ou plaquettes).

La relation permettant le calcul de diamètre des particules de sol décantées est la loi de Stokes traduite par l'équation 5 suivante :

$$V = (\gamma_s - \gamma_w) \times D / 18\eta \quad \text{(Equation 5)}$$

Avec : V : vitesse de décantation (cm/s),

η : viscosité dynamique du fluide en Pascal Seconde (Pa.s),

D : diamètre de la particule (cm),

γ_s : poids volumique des particules du sol (kN/m³),

γ_w : poids volumique de l'eau (kN/m³).

Des études ont montré que les caractéristiques granulométriques ont une influence non négligeable sur les propriétés géotechniques des sols (ODALELE et *al.*, 2012 ; AVWENAGHA et *al.*, 2014). La granulométrie est également un critère fondamental pour l'identification et la classification des sols.

L'interprétation de cette courbe ci-dessous (figure 12) permet d'identifier les types de sol qui composent l'échantillon d'emprunt analysé. Par exemple, si, en examinant une courbe granulométrique, d'un échantillon d'emprunt, quelconque, constitué de gravier, de sable, de silt et d'argile, on trouve les proportions respectives des particules constitutives de chaque type de sol exprimées en pourcentages tel que l'on connaît ces proportions, il devient possible d'attribuer au sol une appellation de la manière indiquée au tableau XI ci-après (CEBTP, 1980). Ainsi, le sol quelconque composé de 27% de gravier, 38% de sable, 29% de silt et 6% d'argile, par exemple, porte le nom de sable silteux graveleux avec traces d'argile ; selon les recommandations du tableau XI CEBTP (1980).

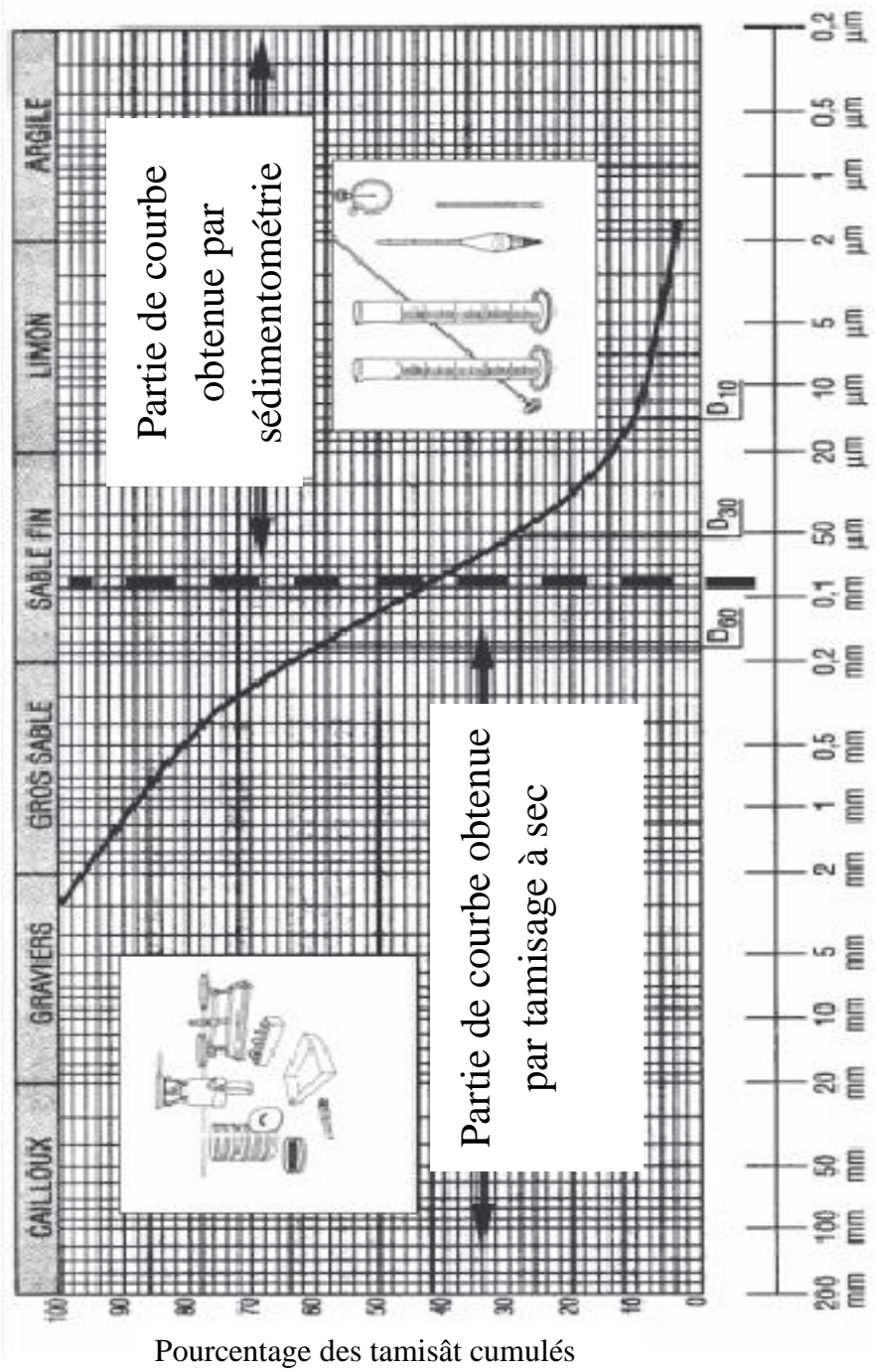


Figure 12 : Courbe granulométrique des sols (GUETTOUCHE, 2016)

Tableau XI : Appellation des sols selon les proportions de types de sol (CEBTP, 1980)

Proportion de types de sols	Terminologie	Exemples
>35%	donne le nom du sol	Gravier, sable, silt, etc.
20% à 35%	donne l'adjectif	Graveleux, sableux, etc.
10% à 20%	un peu	Avec des traces d'argiles de silt, etc.
<10%	définit la Trace	

IV.3.1.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg des sols sont des essais de laboratoire réalisés en deux phases suivantes :

- recherche de la teneur en eau (W) pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se referme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la Norme Française NF P 94-051 (1993) qui donne le mode opératoire des essais d'analyse.

Ces essais permettent d'évaluer : la Limite de Liquidité (WL), la Limite de Plasticité (WP), l'Indice de Plasticité (IP) ainsi que l'Indice de Consistance (IC) à travers respectivement les équations 6 pour l'indice de plasticité et 7 pour l'indice de consistance comme ci-dessous. L'indice de plasticité indique dans quelle mesure les particules d'argile sont présentes dans un sol. Sa détermination repose sur les limites de consistance c'est-à-dire le passage du sol d'un état solide à un état plastique WP puis de l'état plastique à un état liquide WL en présence d'eau. Il permet d'apprécier la quantité et le type d'argile présente dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon, puis permet de déterminer le traitement approprié aux liants hydraulique d'un sol (ABDO, 2008 ; GTS, 2015).

$$IP = WP - WL \quad \text{(Equation 6)}$$

$$IC = (WL - W_n) / IP \quad \text{(Equation 7)}$$

IV.3.1.3. Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène a été effectué selon la Norme Européenne NF EN 933-9 (2013) qui donne les conditions d'obtention des résultats de l'analyse. Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et des granulats à l'aide du liquide colorant de bleu de méthylène de formule $C_{16}H_{18}ClN_3S$.

Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai au bleu de méthylène dépend directement, à la fois, de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction argileuse (TRAN, 2009).

Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tache. Ce test consiste à former avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore.

L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu-clair. On dira alors que le test est positif, (TOURENQ *et al.*, 1989).

IV.3.1.4. Diagramme de plasticité

En 1932, Casagrande proposa un diagramme de plasticité permettant d'identifier les sols à grains fins à partir des limites d'Atterberg (Figure 13) ci-après. Le diagramme est divisé en deux zones par la ligne A, chaque zone étant elle-même subdivisée en trois régions, selon la plasticité des sols.

Le diagramme de plasticité de Casagrande donne des renseignements sur l'argilosité d'un sol. En effet les sols argileux se placent en général de façon structurée dans un diagramme de Limite de liquidité WL en fonction de l'Indice de plasticité IP comme sur la figure 13 ci-dessous. Les dénominations des sols dépendent de leur position dans le diagramme par rapport à une droite appelée ligne A d'équation $IP = 0,73 (WL - 20)$ pour $WL > 30$ (GUETTOUCHE, 2016). On a des argiles au-dessus de la ligne A, des limons en dessous. On a des sols peu plastiques si $WL < 50$ et très plastiques si $WL > 50$. Les argiles gonflantes se placeraient de façon presque parallèle au-dessus de la ligne A.

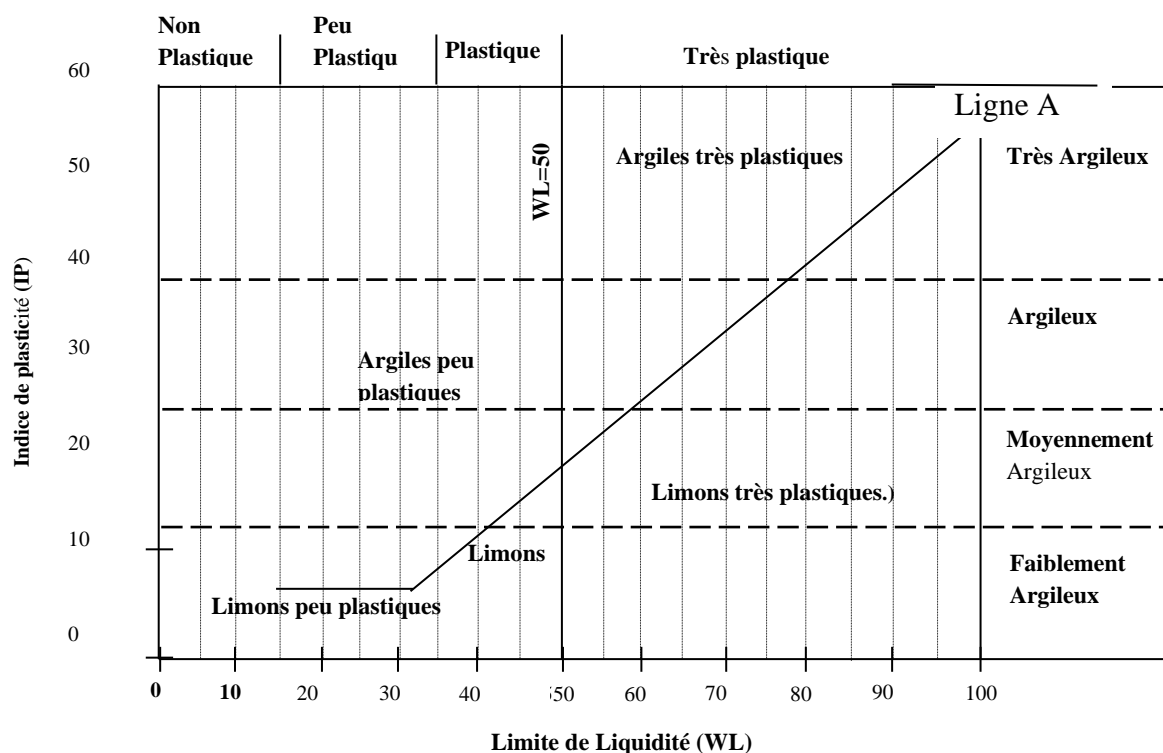


Figure 13 : Diagramme de plasticité (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997)

IV.3.1.5. Identification et appellation des sols

Les systèmes d'identification triangulaire des sols, prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol (Figure 14). Ces triangles sont divisés en zones et chaque zone porte une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle. Utilisons le diagramme de la figure 14, pour identifier un sol quelconque comportant 41% d'argile, 42% de sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols.

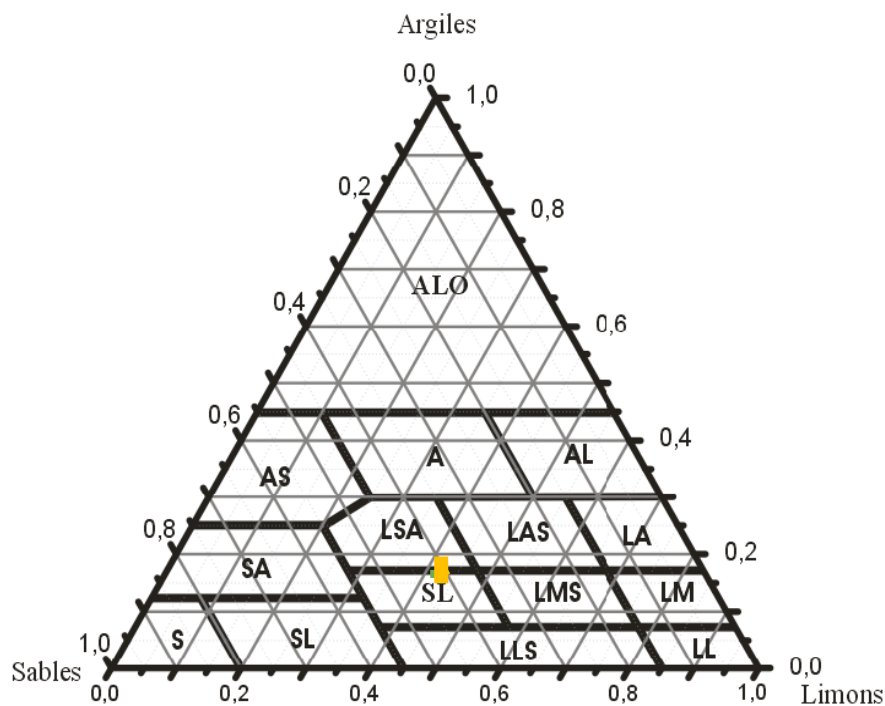


Figure 14 : Identification dans le triangulaire textural de Casagrande.

IV.3.1.6. Essai Proctor modifié et Essai de portance CBR à 4 jours d'immersion à 95% de l'Optimum Proctor Modifié

Par une opération de compactage qui permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance, l'essai Proctor selon la norme française NF P94-093 (2014) permet de déterminer la masse volumique sèche apparente maximale ρ_{dop} obtenue pour une teneur en eau spécifique et optimale W_{OP} . La masse volumique sèche apparente finale d'un sol dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage.

On distingue deux types d'essai : l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié ; les deux essais sont identiques dans leur principe. Seulement, les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée diffèrent (TANKPINOU, 2016). Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau selon la courbe Proctor de la figure 15 ci-dessous.

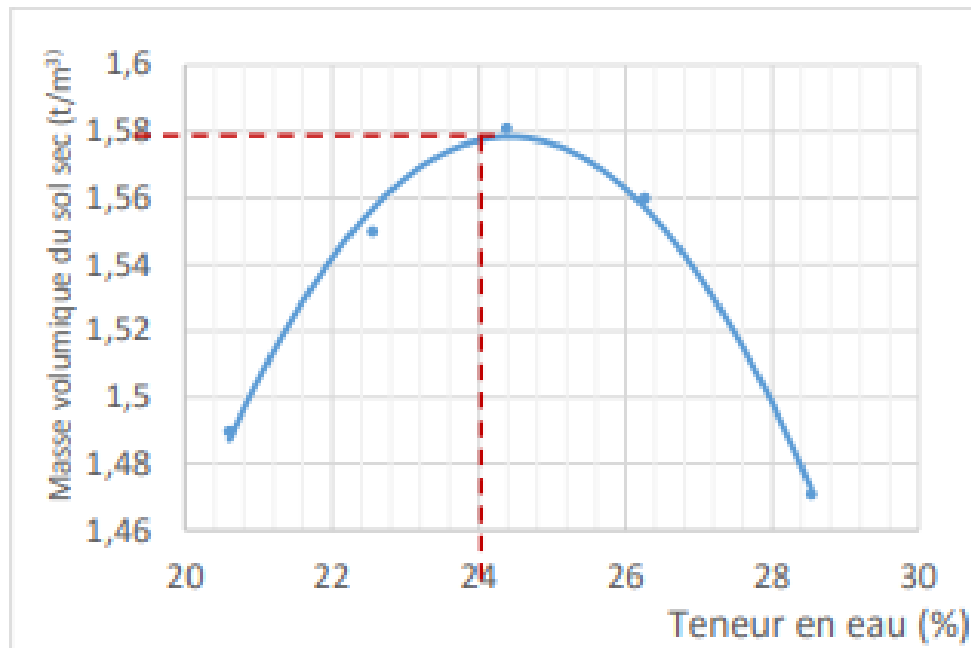


Figure 15 : Exemple de courbe Proctor (TANKPINOU, 2016).

D'une manière générale cette courbe présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau (Figure 15) ci-dessus : ce sont les caractérisations optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé. Graphiquement la densité sèche optimale correspondant au Proctor est le point sur l'axe des ordonnées où s'effectue le changement de concavité de la courbe Proctor pour une teneur en eau donnée appelée teneur en eau de l'optimum Proctor.

Pour l'essai CBR (California Bearing Ratio), il permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols à divers degrés de compactage. Le principe de l'essai CBR se fait selon le mode opératoire contenu dans la normalisation française NF P94-078 (1997) et qui consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Il permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement à travers les forces F1 et F2. Les valeurs particulières des deux forces (F1 et F2) ayant provoqué deux enfoncements conventionnels de 2,5 mm et 5 mm sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées, comme indiquées dans l'équation 8 ci-dessous, sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (TANKPINOU, 2016).

$$\text{ICBR}_{2,5} = F_1/7 \text{ et } \text{ICBR}_5 = F_2/10,5 \quad (\text{Equation 8})$$

L'indice CBR recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. $\text{CBR} = 100 * \text{Max}(\text{ICBR}_{2,5}; \text{ICBR}_5)$.

IV.3.2. METHODES DE CARACTERISATION MECANIQUE DE LA MATIERE PREMIERE

1) Essai œdométrique

L'essai œdométrique est réalisé selon la norme (XP P 94-090-1) (1997). Il s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide appelée (cellule œdométrique). Un dispositif applique, sur cette éprouvette, un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers successifs maintenus constants d'abord croissants ensuite décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Les essais œdométriques ont été réalisés en utilisant une cellule œdométrique de 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Les principaux paramètres déduits de l'essai sont multiples, entre autres : le coefficient de compressibilité (C_c), le coefficient de gonflement volumique (C_g), les indices de vides (e_0), les poids volumiques humide (γ_h) et sec (γ_d) et la contrainte de pré-consolidation (σ'_p) à partir laquelle l'on calcule les précédents, notamment le coefficient de gonflement volumique de la matière première sol remanier.

L'appareil œdométrique utilisé pour la réalisation de cet essai, ainsi que l'éprouvette après essai, sont illustrés à la Figure 16 ci-dessous.



Figure 16 : Dispositif œdométrique permettant de réaliser l'essai œdométrique et éprouvette de sol après test de compressibilité.

2) Méthodes d'estimation des propriétés de compressibilité

- Détermination de la pression de consolidation σ'_p et calcul de C_g

La méthode de détermination de la pression de pré-consolidation σ'_p graphiquement sur la courbe représentant l'indice des vides (e) en fonction du logarithme en base 10 de σ'_p l'indice de compressibilité ($\text{Log } \sigma'_p$) qui permet de déterminer le coefficient de gonflement volumique C_g des sols est celle dite de Casagrande (SOULEY, 2016).

Ce dernier a proposé une méthode à partir de la bissectrice TC, la droite TT de rayon de courbure minimal r_{\min} de la courbe (II) comme indiqué ci-dessous (Figure 17).

Après avoir tracé les deux directions asymptotiques TT et IA des deux parties de la courbe, une bissectrice (TC) est tracée à partir du sommet T correspondant au rayon minimal de la courbe de compressibilité. La projection sur l'axe des abscisses du point d'intersection D entre la bissectrice (TC) et le segment IA correspond à la contrainte de pré-consolidation σ'_p sur la figure 17 .

Sur la Figure 17, on observe qu'en prenant une pression de pré-consolidation quelconque σ'_z

- si $\sigma'_z < \sigma'_p$ le sol se déforme très peu parce qu'il a déjà été consolidé, au cours de son histoire, sous l'effet d'une pression qui, à sa valeur maximale, était égale à σ'_p ,
- si $\sigma'_z > \sigma'_p$ le sol est beaucoup plus déformable, il est soumis à des contraintes supérieures à toutes celles qu'il a connues. La partie correspondante de la courbe est appelée courbe vierge.

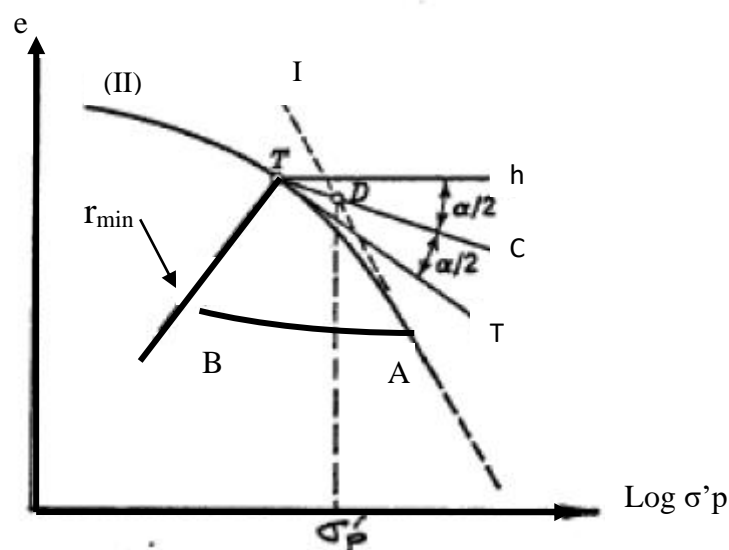


Figure 17 : Méthode de détermination graphique de la contrainte de pré-consolidation σ'_p par Casagrande (SOULEY, 2016)

- **calcul du coefficient de gonflement volumique Cg et aptitude au traitement des sols**

Le coefficient de gonflement volumique d'un sol appelé Cg est calculé à partir de l'équation 9 qui est la pente moyenne, au signe près d'un cycle déchargement-rechargement représenté par la partie AB sur la figure 17 précédente.

La formule permettant le calcul de l'indice de gonflement Cg est donnée par l'équation 9 suivante :

$$C_g = -\frac{\Delta e}{\Delta(\lg \sigma'_z)} \text{ (Pour } \sigma'_z \leq \sigma'_p \text{) avec } \Delta(\lg \sigma'_z) = \lg(\sigma'_p) - \lg(\sigma'_z) = \lg\left(\frac{\Delta \sigma'_p}{\sigma'_z}\right) \quad \text{(Equation 9)}$$

Cg étant évalué, l'aptitude au traitement du sol est interprétée à partir des mesures du coefficient de gonflement volumique (Cg) du sol traduit dans le tableau XII ci-dessous, selon la Norme Européenne NF EN 13286-49 (2015) du LCPC (2007).

Tableau XII : Aptitude d'un sol au traitement (LCPC, 2007)

Type de traitement	Aptitude au traitement	Gonflement volumique Cg (%)
Traitement avec LHR ou		
ciment	Apte directement	$C_g \leq 5$
Essai « accéléré » :	Douteux : potentiellement	$5 < C_g \leq 10$
7 jours-40°C	Inapte : insuffisant	$C_g > 10$

Le tableau XII décrit, donc, trois niveaux d'acceptabilité dans le traitement d'un sol :

- Apte directement ($C_g \leq 5$), ce qui signifie que le sol répond bien au traitement des liants, il gonfle peu et présente une assez bonne disposition aux traitements de stabilisants.
- douteux ($5 < C_g \leq 10$), traduit que le sol est potentiellement apte au traitement si certaines précautions sont prises in situ pour le drainage des couches, si le sol est légèrement sensible à l'eau.
- Inapte si les caractérisations physiques ou mécaniques sont insuffisantes. Dans ce cas faire une mise en dépôt ou bien revoir une autre formulation du sol.

IV.3.3. METHODES DE CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DE LA MATIERE PREMIERE

IV.3.3. 1. Méthodes de caractérisation chimique

La détermination de la composition chimique d'un échantillon est précédée d'une mise en solution adéquate. La mise en solution choisie est celle d'une attaque triacide (acide chloridrique HCl, acide sulfurique H₂SO₄, acide nitrique HNO₃) proposée par NJOPWOUO et *al.* (1979) suivant les différents dosages qui sont présentés comme suit :

Le dosage des éléments chimiques de la solution par la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) :

Dans ce cas, la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) dont le principe a été proposé par WALSH (1955) est l'une des méthodes les plus courantes pour l'analyse chimique élémentaire.

C'est une méthode d'analyse qui consiste à mesurer l'intensité de la lumière absorbée par un atome à l'état fondamental. La technique est basée sur le fait que tout corps peut absorber la radiation qu'il émet.

L'analyse a été effectuée au laboratoire de la SODEMI et les éléments qui ont été analysés par cette technique sont les oxydes et a porté sur les échantillons de Samo, Songon, Bingerville et Grand-Lahou.

Pour le dosage d'un élément chimique, la solution a été pulvérisée dans une flamme air-acétylène provoquant la dissociation et le retour à l'état fondamental des atomes. L'anticathode correspondant à l'élément dosé a été placée et un choix judicieux de la fente et de l'énergie a été effectué. Pour des solutions concentrées, des dilutions ont été faites. Pour le dosage de manganèse Mn, calcium Ca et magnésium Mg, les solutions ont été diluées avec une solution de nitrate de lanthane La(NO₃)₃ de concentration 6,23 g l⁻¹ pour éliminer des interférences chimiques.

Le dosage du titane par la spectrométrie d'absorption moléculaire ou colorimétrie.

Dans cette technique d'analyse appelée colorimétrie, un rayon lumineux de longueur d'onde (λ) et d'intensité (I_0) traversant un milieu homogène d'épaisseur 1 cm, subit une absorption proportionnelle à la concentration (C) de la substance absorbante dissoute. Elle repose sur la loi de Beer-Lambert. Pour le dosage du titane Ti, on a prélevé 25 ml de filtrat (I) que l'on a évaporé à sec. Le précipité obtenu a été repris par (5%) d'acide sulfurique H₂SO₄ afin d'avoir une concentration acide. Après la reprise et la mise en fiole de 100 ml, pour développer la

coloration du complexe, on a ajouté dans l'ordre 6 ml d'acide phosphorique H_3PO_4 concentré pour complexer le fer Fe, 6 ml de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 . On a ensuite complété à 100 ml avec (5%) d'acide sulfurique H_2SO_4 . La teneur en dioxyde de titane TiO_2 est obtenue en utilisant une courbe d'étalonnage (VOINOVITCH et *al.*, 1962).

Le dosage de l'aluminium par complexométrie

La complexométrie est l'ensemble des méthodes de dosage qui reposent sur l'emploi des complexants de ces derniers avec la solution du sol disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) $C_{10}H_{16}N_2O_8$ en milieu acide.

Pour le dosage de l'aluminium Al, on a prélevé 50 ml de filtrat auquel 25 ml d'EDTA (Éthylène-diamine-tétra-acétique) de concentration 0,05 M ont été ajoutés.

En présence de deux gouttes de rouge de méthyle $C_{15}H_{15}N_3O_2$ à 0,02%, le pH de la solution a été ramené à 5 par ajout d'un excès de 20 ml de solution tampon pH (5,6).

La solution obtenue a été portée à l'ébullition pendant quelques minutes pour former les complexes d'aluminium Al, de fer Fe et de titane Ti avec l'EDTA (Éthylène-Diamine-Tétra-Acétique). Dix (10) ml de la solution tartrique $C_4H_6O_6$ à 2% et 5 ml de la solution de phosphate d'ammonium $(NH_4)_3PO_4$ à 10% acidifié à l'acide chlorhydrique HCl ont été ajoutés à la solution précédente.

La nouvelle solution est portée à l'ébullition pendant 3 minutes pour libérer le titane (Ti) du complexe.

Après un refroidissement accéléré, on a ajouté autant d'alcool éthylique C_2H_5OH qu'il y a de liquide dans le récipient de dosage. L'alcool permet d'éviter la précipitation de la dithizone insoluble dans l'eau ; 5 ml de solution de dithizone $C_{13}H_{12}N_4S$ à 0,25% dans l'alcool ont été ajoutés. La complexion en excès a été titrée par une solution de chlorure de zinc $ZnCl_2$ à 0,05 M jusqu'au virage au rouge franc, 30 ml de solution de Fluorure de sodium NaF à 4% ont été ajoutés à la solution précédente et l'ensemble a été porté à l'ébullition pendant 3 minutes en vue de libérer l'aluminium Al du complexe.

Le dosage de la matière organique dans la matière première

Dans ce dosage, le taux de matière organique dans le sol étudié a été déterminé à l'aide de la méthode par pyrolyse au Rock-Eval 6 au Centre d'Analyses et de Recherche de la PETROCI. Le paramètre indiqué par cette méthode pour la détermination de la teneur en matière organique dans les échantillons analysés est le Carbone Organique Total (COT). Il permet de renseigner la capacité d'un sol supporter des charges sous trafic.

La teneur en matière organique sera qualifiée, selon ESPITALIE et *al.*, (1977) ; PETERS et *al.*, (1994) comme sur le Tableau XIII ci-dessous.

Tableau XIII : Classification de la matière organique et aptitude d'un sol utilisable sous trafic en Techniques Routières (ESPITALIE et *al.*, 1977 ; PETERS et *al.*, 1994).

COT (% en poids).	CLASSE	APTITUDE DU SOL
< 0,5	pauvre	apte
0,5-1	moyen	apte
1-2	bonne	apte
2-4	très bon	inapte
>4	excellent	inapte

Dans le cadre de la conception des ouvrages routiers, les sols aptes à être utilisés doivent avoir une teneur en matières organiques inférieure à 2% de classes bonne à pauvre (CEBTP, 1980). On remarque que dans la classification (Tableau XIII) ci-dessus, plus le COT est de classe excellente plus son aptitude est moins avérée quant à son utilisation sous charge en techniques routières.

IV.3.3.2. Méthode de caractérisation minéralogique

La fraction argileuse à granulométrie inférieure à 2 μm , est en général dominée par les phyllosilicates mais comporte des minéraux finement divisés en quantité variable (quartz, calcite, oxyhydroxydes de fer et d'aluminium puis oxydes de titane...). Ce sont surtout les minéraux argileux qui jouent un rôle important dans les propriétés physiques et chimiques des sols (absorption d'éléments chimiques ou de molécules, surface spécifique, agrégation) (CANER, 2011).

L'analyse minéralogique des échantillons de sols remaniés étudiés a été réalisée sur les minéraux argileux au Centre d'Analyses et de Recherche de la Société Nationale des Opérations Pétrolières de Côte d'Ivoire (PETROCI). L'appareillage pour faire cette analyse et obtenir les résultats du laboratoire de cette étude (Source photographique : LABORATOIRE PETROCI, 2021). L'analyse suit les différentes étapes suivantes :

IV.3.3 2.1. Préparation des échantillons

Les différentes étapes de la préparation des échantillons pris au laboratoire pour l'analyse des minéraux argileux des sites d'emprunt sont les suivantes :

IV.3.3. 2.1.1. Décarbonatation

Pour l'analyse minéralogique, 5 grammes de chaque échantillon d'emprunt de sol sont pesés à l'aide d'une balance électrique et versés dans un bécher en verre contenant 200 ml d'eau distillée. L'on adjoint, par jet, de l'acide chlorhydrique HCl dilué à 10%, tout en agitant la préparation afin d'éviter la surconcentration locale.

L'opération est menée avec des temps d'arrêt pour permettre la dissolution totale des carbonates. Le pH de la solution est contrôlé à l'aide du papier pH ou pH-mètre. Dès que cette solution atteint un pH acide < 7 , matérialisé par la coloration rose du pH-mètre, on entame le processus d'élimination de la matière organique comme suit :

IV.3.3.2.1.2. Elimination de la matière organique

Une petite quantité d'eau oxygénée à 10% est ajoutée à la solution décarbonatée et l'observation d'une effervescence marque la présence organique dans l'échantillon. Pour l'éliminer, on ajoute au mélange, de l'eau oxygénée jusqu'à disparition totale de l'effervescence. A la fin de cette opération, 200 ml d'eau distillée sont ajoutés à la préparation et on passe à l'étape de la décantation et au lavage des échantillon prélevés au laboratoire sur les échantillons d'emprunt des sites de prélèvement.

IV.3.3.2.1.3. Décantation et le lavage des échantillons

La solution est ensuite versée dans une ampoule de décantation puis, on la laisse au repos pendant 5 minutes. La fraction fine est subséquemment recueillie dans un godet de centrifugation puis centrifugée pendant plusieurs fois à la vitesse de 2 000 tours/min. Lorsque le liquide dans le godet devient trouble, en ce moment, on procède à une dernière centrifugation de 3 000 tours/mn pendant 40 mn. La fraction argileuse ainsi lavée est conservée dans un pilulier pour le prélèvement de la fraction fine argileuse.

IV.3.3.2.1.4. Prélèvement de la fraction argileuse

L'échantillon contenu dans le pilulier est homogénéisé par agitation à la main. Puis, on le laisse reposer pendant 50 mn. Ce qui correspond à la sédimentation des particules de diamètre

< 2 μm . Après ce temps, on prélève par pipetage les 2 cm supérieurs de la suspension (mesuré à partir de la surface du liquide) puis on passe à l'étape de la confection des lames orientées.

IV.2.3.2.2. Confection des lames orientées

L'analyse des échantillons disposés sur des lames par Diffraction des Rayons X (DRX) des minéraux argileux est effectuée au diffractomètre D8 ADVANCE de Bruker.

L'identification des minéraux après analyse s'est faite grâce au logiciel Fityk (CANER, 2011) et s'appuie sur les positions des pics à certaines distances réticulaires dans le plan (001) sur les diffractogrammes ci-après du tableau XIV ci-après (THOREZ, 1976). On recherche donc à renforcer les réflexions (001) en orientant les particules selon l'aplatissement dans le plan (001).

A cet effet, la suspension pipetée est déposée sur des lames de verre (Source photographique : LABORATOIRE PETROCI, 2021). L'analyse par DRX peut se faire sur trois types d'essais qui sont complémentaires que sont :

- **premier type d'essai, les lames normales (N)**

Dans cet essai, les lames sont séchées à l'air ou au four à 40°C pendant 3 heures (HUBERT, 2008). Les diffractogrammes de DRX enregistrés servent de référence pour apprécier les déplacements de raies occasionnés par les autres types d'essai.

- **deuxième type d'essai, les lames glycolées (EG)**

Ce type d'essai à l'éthylène-glycol a pour effet de faire « gonfler » les minéraux gonflants comme les smectites contenues de l'échantillon. Les lames sont placées dans l'atmosphère d'éthylène-glycol durant 12 heures au minimum. Cette atmosphère d'éthylène est obtenue en faisant le vide dans le dessiccateur, dans lequel ont été mis quelques cm^3 d'éthylène-glycol. Pour conserver la saturation des argiles, les lames doivent être analysées au DRX dans un intervalle de temps limité (40 min maximum) après saturation. Un temps plus long entraînerait une désaturation progressive des argiles car l'éthylène-glycol est volatil.

- **Troisième type d'essai, les lames chauffées (CH500)**

Dans ce type d'essai, les lames sont chauffées à 500°C pour détruire la kaolinite mais cela est sans effet sur les chlorites. Les minéraux de la famille des vermiculites et smectites sont déshydratés de façon irréversible à cette température. Cette perte en eau provoque un déplacement de la raie 001 de 15 à 10 Å. On dit que ces argiles se referment à 10 Å après chauffage. Cette fermeture des minéraux est une caractéristique pour leur identification et surtout pour l'identification des interstratifiés contenant des feuillets de minéraux de type

smectiques et vermiculitiques. La semi-quantification a été calculée à partir des facteurs correctifs d'intensité selon le tableau XIV (THOREZ, 1976).

Tableau XIV : Position de raies (001) des principaux minéraux argileux (THOREZ, 1976)

N	Spectres		Minéraux
	EG	CH500	
7	7	-	Kaolinite (K)
10	10	10	Illite (I)
14	14	14	Chlorite (C)
14	16	10	Chlorite (Cg)
14	14	10	Vermiculite (V)
12-14	17	10	Smectite (S) Montmorillonite
10,4	10,4	10	Palygorskite (Pal)
12	12	10	Sépiolite (Sep)

IV.4. METHODE DE MISE EN ŒUVRE DES MELANGES CHAUX ET CIMENT A LA MATIERE PREMIERE

Cette méthode consiste à mélanger la partie de plus grand diamètre 0/5 mm d'un échantillon de sol à des dosages croissants de produit de traitement aux mélanges (chaux vive et ciment) et à les humidifier à des teneurs en eau croissantes afin d'obtenir celle qui correspond à la densité sèche la plus élevée avec une teneur en eau faible.

On distinguera des gammes en fonction du numéro de dosage aux mélanges chaux-ciment et sol. Les mélanges ainsi obtenus sont fonctions du taux de chaux fixé définissant la gamme.

Au moins trois dosages par teneur en chaux ; et en faisant varier la teneur en ciment de (2%, 4% et 6%...). Soit pour la gamme 1 : numéro de mélange chaux et ciment (1, 2, 3...) correspondant respectivement à (1% de chaux et 2% de ciment), (1% de chaux et 4% de ciment), (1% de chaux et 6% de ciment) ... etc.

On retiendra autant que possible le mélange de valeur de densité sèche le plus élevée et de plus faible teneur en eau optimale pour chacune des gammes (1 ; 2 ; 3...) et sera désigné comme le mélange de chaux et ciment dans la gamme.

Ces systèmes de mélange vont également permettre d'obtenir des plages d'états hydriques prévisibles pour la période d'exécution des travaux de terrain dans le but de réaliser l'humidification des échantillons et leur mélange avec le produit de traitement de chaux et ciment.

Ici, l'utilisation du malaxage manuel a été appliquée, étant donné que les concernés seront presque toujours plus ou moins plastiques.

Au bout de ce malaxage l'on a effectué le compactage pour la détermination des densités sèches et des différentes teneurs en eau. Le tableau XV ci-dessous, présente les différentes possibilités de traitement de mélange chaux et ciment d'un sol qu'on pourrait avoir, en faisant varier les dosages en chaux et les dosages en ciment, mélangés, pour le traitement d'un sol quelconque donné.

Tableau XV : Mise en œuvre des mélanges chaux et ciment pour sol remanié
Norme Française NF P 94-102-2 (2001).

Sol remanié des localités	Taux de		N° dosage	Proctor Modifié Mélange chaux et ciment	CBR à 95% OPM 4 jours d'immersion Densité sèche élevée et Teneur en eau faible de la gamme
	CHAUX	CIMENT			
Sol état naturel	0%	0%	0	0% chaux+0% ciment	
Sols traités de Grand-Lahou, Songon, Bingerville et Samo		2%	1	1 % chaux+2% ciment	
	1%	4%	2	1% chaux+4% ciment	GAMME 1
		6%	3	1% chaux+6% ciment	
		2%	4	2% chaux+2% ciment	
	2%	4%	5	2% chaux+2% ciment	GAMME 2
		6%	6	2% chaux+2% ciment	
		2%	7	3% chaux+2% ciment	
	3%	4%	8	3% chaux+2% ciment	GAMME 3
		6%	9	3% chaux+2% ciment	

IV.5. METHODE DE CONFECTION DES EPROUVETTES

Cette méthode peut être subdivisée en plusieurs étapes : mélange, gâchage, malaxage, compactage (moulage) et démoulage. Chaque bloc est élaboré à partir de 6 kilogrammes d'un mélange de sol remanié et du mélange (chaux et ciment).

Les différents constituants sont d'abord mélangés et homogénéisés à sec. Ensuite, on ajoute la quantité d'eau de gâchage appropriée suivant la technique décrite par l'essai Proctor modifié selon la Norme Française (NF P 94-093).

De façon pratique, il s'agit de déterminer la quantité d'eau qu'il faut ajouter au mélange afin d'avoir un matériau qui ait une densité sèche élevée dans une gamme.

En effet, pour une presse permettant un compactage statique d'un sol donné, il existe pour une quantité de matériau, une teneur en eau qui permet d'obtenir une densité sèche élevée (CRATERRE, 1998).

Egalement, un bloc ayant une densité élevée aura une résistance mécanique élevée (NORTON, 1986).

Après gâchage, on procède au malaxage pour homogénéiser la pâte. On prélève ensuite 4,5 kg de ce mélange pour le compactage. Il est réalisé à l'aide d'une presse manuelle de type Terstaram permettant de faire un compactage statique (Figure 11-D).

Le matériau est introduit dans un moule Proctor modifié, préalablement, badigeonné de lubrifiant afin de faciliter le démoulage.

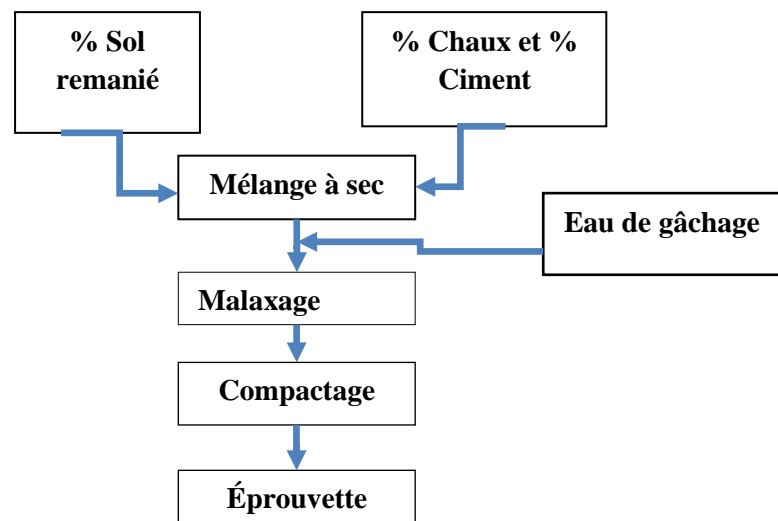


Figure 18 : Etapes de la mise en œuvre des éprouvettes pour compactage (GREHOA, 2016).

IV.6. METHODE DE CARACTERISATION MECANIKES DE L'ÉPROUVETTE APRES ETUDE DES MELANGES SOL ET LES LIANTS HYDRAULIQUES

IV.6.1. RESISTANCE A LA TRACTION D'UN MATERIAU

L'essai de fendage ou de traction, important en construction routière, permet de déterminer la capacité d'un matériau à résister à un effet de compression sur deux génératrices diamétralement opposées (SOULEY, 2016).

L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques caractérisé par un début de traction et une rupture du matériau ci-après (Figure 19). Une force de compression est appliquée sur ces

éprouvettes jusqu'à leurs ruptures. Cet effort induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. Pendant cette sollicitation, des capteurs de force et de déplacement sont montés sur les éprouvettes. Ils permettent de lire en continu les valeurs de l'effort et de la déformation (NGUYEN *et al.*, 2015). Les formules permettant de calculer la contrainte de traction et la déformation sont respectivement définies par les équations 11 et 12 suivantes :

$$\sigma_t = (2F)/3,14DL$$

Avec : σ_t la contrainte exprimée en Méga Pascal (MPa), F : la charge maximale en Newton (N), D : le diamètre de l'éprouvette en millimètre (mm).

$$\varepsilon_t = (l_0 - l_1)/3,14DL \quad \text{(Equation 12)}$$

Avec : ε_t : la déformation exprimée en pourcentage (%), l_0 est la longueur initiale en mètre (m), l_1 : la longueur finale après rupture en mètre (m).

Le positionnement de l'éprouvette est assuré à 0,5 mm après. La vitesse de chargement doit être égale à 0,5 MPa/s soit un accroissement de la force 4,01 kN/s à 0,80 kN/s pour une éprouvette de dimension 16*32 cm. La vitesse du chargement doit être constante et égale à 0,05 MPa/s \pm 0,01 MPa soit un accroissement de la force de 4,01 kN/s \pm 0,5 kN/s.

La vitesse de chargement a été de 0,05 MPa/s. La contrainte à la rupture est donnée par l'équation 13 selon la relation :

$$R_t = (20F)/3,14.ah = 6,37.F/ah \quad \text{(Equation 13)}$$

Avec R_t : contrainte à la rupture en (MPa), F : charge appliquée en (kN), a : diamètre de l'éprouvette en (cm), h : hauteur de l'éprouvette en (cm)

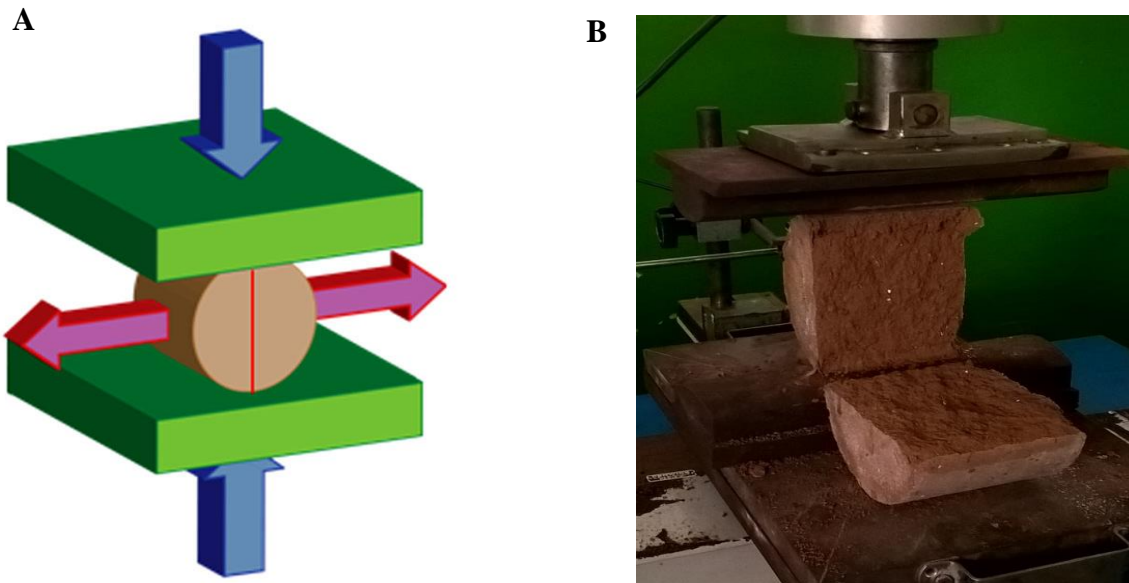


Figure 19 : Essai de résistance à la traction ; A) Début de la traction et B) Rupture du matériau (NF P 98-232-2, 1992)

IV.6.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION D'UN MATERIAU

Une éprouvette de sol est comprimée par moulage dans un moule puis conservée dans l'eau à 20°C pendant différents âges de cure dans l'eau.

Les éprouvettes cylindriques sont essuyées et pesées et ses extrémités rectifiées par surfacage avec du soufre. Les blocs doivent être pesés (à 5 g près) et mesurés précisément (à 0,5 mm près) avant essai, et la teneur en eau résiduelle doit être évaluée après essai. Les échantillons prélevés sur l'ensemble des blocs doivent avoir une densité sèche identique, seule une variation de 1% maximum est tolérée entre blocs d'un même échantillonnage.

L'éprouvette est centrée sur une machine d'essai étalonnée, elle est ensuite soumise à une charge croissante appliquée jusqu'à rupture à une vitesse constante. On mesure également à 28 ; 90 puis 360 jours de cure dans l'eau et la résistance à la compression est le rapport entre la charge maximale appliquée à la surface de l'éprouvette.

La résistance à la compression est déterminée par l'équation 14 ci-dessous et caractérisée par un début de compression et une rupture du matériau ci-après (Figure 20). C'est le rapport entre la charge de rupture et la section ou surface transversale de l'éprouvette.

$$R_c = (10 \times F) / S \quad \text{(Equation 14)}$$

R_c : résistance à la compression de l'éprouvette en MPa. ; *F* : charge maximale supportée par l'éprouvette en kN. ; *S* valeur moyenne de la section en cm².

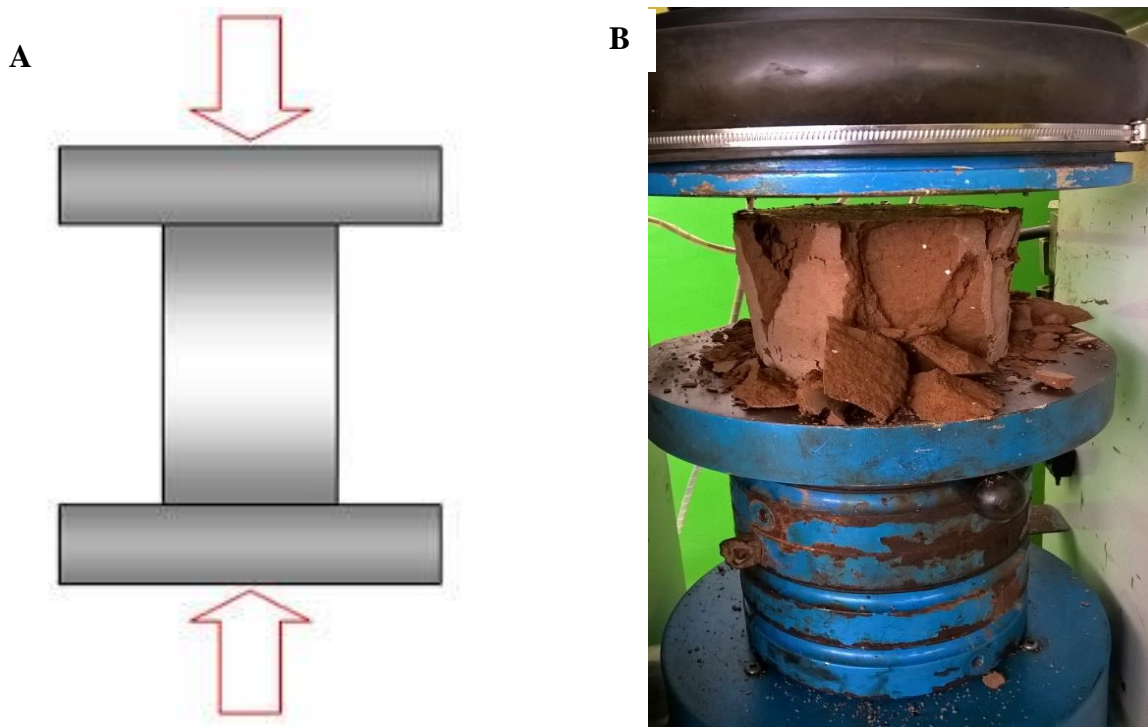


Figure 20 : Essai de résistance à la compression ; A) Début de la compression et B) Rupture du matériau (NF P 98-232-1, 1991).

IV.6.3. METHODE DE DETERMINATION DES PROPRIETES MECANQUES A 360 JOURS DE CURE DANS L'EAU DES SOLS TRAITES AU MELANGE CHAUX ET CIMENT

Les propriétés mécaniques à 360 jours de cure dans l'eau des matériaux traités au mélange chaux et au ciment sont effectuées afin de connaître les paramètres de dimensionnement notamment la résistance à la traction et à la compression puis les modules mesurés, à cette dernière échéance, permettent d'évaluer le potentiel des matériaux pour une utilisation en couche d'assise de chaussée. Les coefficients de correspondance des résistances R_{t90}/R_{t360} et des modules E_{t90}/E_{t360} seront déterminés et calculés à partir des courbes contraintes-sur l'annexe 2 (FORTUNIER, 1985) puis comparés à ceux préconisés par les Normes Françaises NF P 98-115 (2009) et NF P 98-114-3 (2009) pour des matériaux standards traduites par les équations 15 et 16 ci-dessous (LAVALLEE et *al.*, 2018).

$$1,1 = (R_{t360})/(R_{t90}) \quad \text{(Equation 15)}$$

$$1,3 = E_{t360}/(E_{t90}) \quad \text{(Equation 16)}$$

IV.7. DIMENSIONNEMENT D'UNE ASSISE DE CHAUSSEE A L'AIDE DE LA METHODE DU CEBTP ET DU LOGICIEL ALIZE (LCPC)

IV.7.1. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT

La structure d'une chaussée routière doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et elle doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation. L'application d'une charge roulante induit ainsi une déformation en flexion des couches de la structure ci-dessous (Figure 21). Cette flexion entraîne des sollicitations en compression au droit de la charge et des sollicitations en traction à la base des couches d'enrobés selon ALIZE-LCPC, (2016). On distingue six principales familles de structures de chaussées (les structures souples, bitumineuses épaisses, à assises traitées aux liants hydrauliques, mixtes, inverses et en béton de ciment) actuellement utilisées sur le réseau routier et autoroutier. Les structures dites semi-rigides sont celles dont les assises sont essentiellement constituées de matériaux traités aux liants hydrauliques. Différentes méthodes sont développées dans la littérature pour le dimensionnement des structures des chaussées (MENGUE *et al.*, 2015).

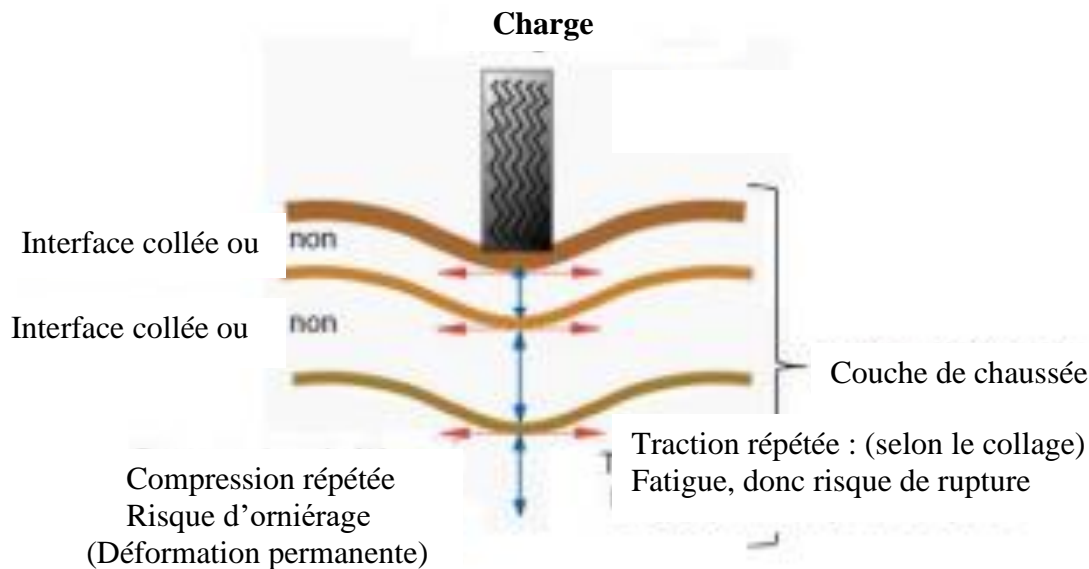


Figure 21 : Sollicitations dans la chaussée (MENGUE *et al.*, 2015).

IV.7.2. METHODE DE DIMENSIONNEMENT

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement de structures de chaussées. Celles-ci peuvent être résumées suivant deux approches différentes à savoir : l'approche empirique basée sur le choix de la structure à travers les catalogues de dimensionnements et l'approche mécanistique-empirique ou analytique-empirique utilisant un logiciel de vérification et de

dimensionnement de la structure (LBTP, 1977 ; LCPC, 1994). Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses limites par rapport aux conditions locales de chaque administration. La méthode française du LCPC-SETRA, faisant référence à une approche mécaniste-empirique, est présentée dans la suite de cette étude. Cette méthode française de dimensionnement des chaussées est basée à la fois sur les calculs théoriques et les expériences (LCPC, 1994). La méthode combine différentes données que sont :

- l'analyse théorique de la mécanique de chaussée, celle-ci est effectuée par le logiciel ALIZE (LCPC, 1994), qui se base sur le modèle élastique linéaire de BURMISTER (1943).
- les résultats d'essai de laboratoire sur le comportement en fatigue des matériaux de chaussée.
- les données obtenues par l'observation du fonctionnement des chaussées.

Les paramètres essentiels pour les calculs théoriques de la méthode française de dimensionnement des chaussées sont :

- d'abord, le trafic qui exprime pour une voie de circulation, le nombre de passages de véhicules dans une période déterminée. C'est aussi la combinaison de différents types de véhicules, avec des charges et des géométries d'essieux très différentes. Cette méthode de dimensionnement utilise un essieu de référence comme un essieu simple à roues jumelées exerçant une charge totale de 130 kN ci-après (Figure 22). Les Voies du Réseau Structurant (VRS) et les Voies du Réseau Non Structurant (VRNS) représentent les deux catégories de voie prises en compte lors du dimensionnement (MENGUE *et al.*, 2015).

- Puis, les paramètres de base du calcul qui fixent le choix de ces données en termes probabilistes.

En effet, en Côte d'Ivoire, le BNETD (Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement) en tenant compte des recommandations du LCPC (1994) adopte, 20 ans pour les Voies du Réseau Structurant (VRS) et pour les autres voies, désignées par le sigle (VNRS).

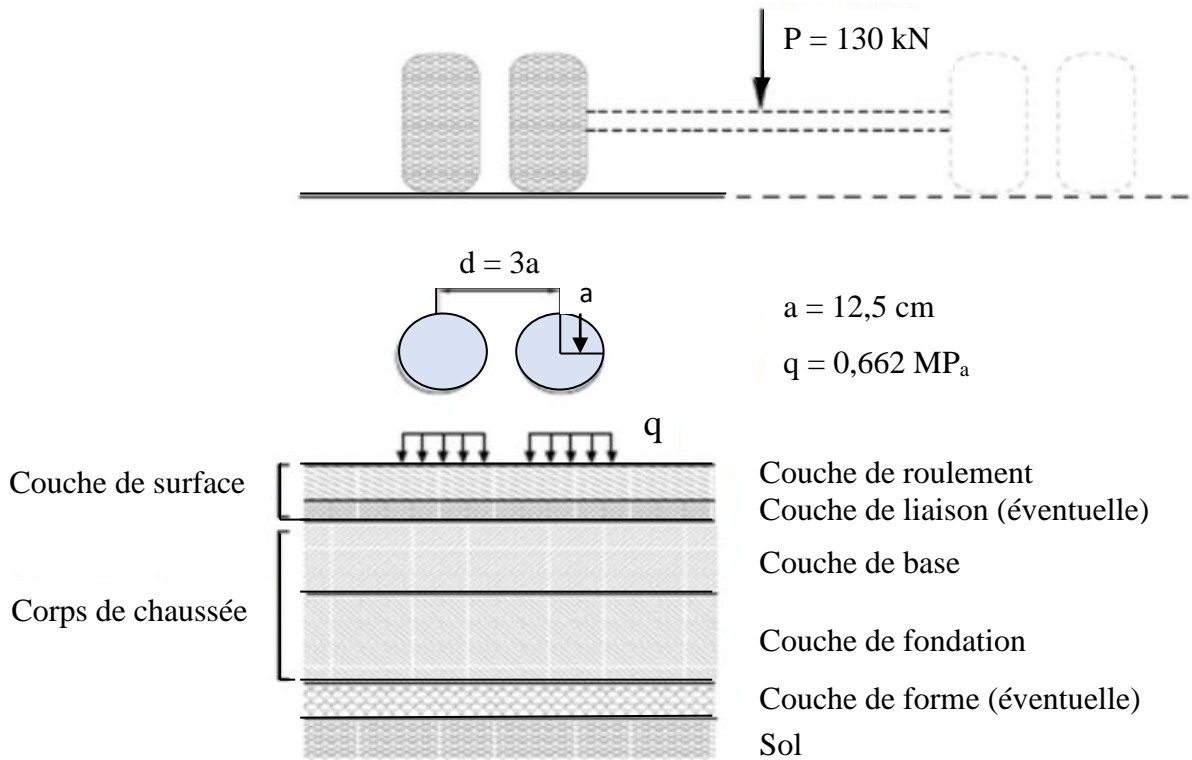


Figure 22 : Massif multicouche et charge de référence (MENGUE *et al.*, 2015).

- En fin, les paramètres descriptifs du sol support et des matériaux d'assise de chaussée :

Les propriétés des matériaux permettent de calculer les sollicitations admissibles. Elles permettent également de déterminer les contraintes et déformations dans le corps de la chaussée grâce au modèle théorique. Les contraintes et les déformations admissibles sont déterminées à partir des résultats de l'essai de fatigue au laboratoire (MENGUE *et al.*, 2015).

Les différents paramètres sont évalués en connaissant le trafic cumulé, le risque de calcul et les données d'observation du comportement des chaussées similaires.

Les limites admissibles pour chaque type de matériaux sont calculées à partir des trois formules générales suivantes selon MENGUE *et al.* (2015) :

- En ce qui concerne les matériaux bitumineux cette limite tient compte de la déformation admissible traduite par la première formule :

$$\varepsilon_{tad} = \varepsilon_6 (NE/10^6)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s$$

- s'agissant des matériaux traités aux liants hydrauliques cette limite prend en compte la contrainte admissible définie par la deuxième formule :

$$\sigma_{tad} = \sigma_6 (NE/10^6)^b \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_c \cdot k_s$$

- et pour les matériaux granulaires non liés, cette limite est définie à partir de la déformation admissible caractérisée par la troisième formule :

$$\varepsilon_{zad} = A.(NE)^{-0,222}$$

Avec :

- ε_{ad} : allongement admissible à la base des couches bitumineuses.
- σ_{ad} : contrainte de traction admissible à la base des couches traitées aux liants hydrauliques.
- ε_{zad} : est la déformation verticale admissible à la surface du sol support.
- NE : nombre équivalent d'essieux de références correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée initiale de calcul retenue.
- σ_6 et ε_6 : contrainte et déformations correspondantes à 10^6 cycles de charge provoquant la rupture.
- b : pente de la droite de fatigue en coordonnées bi-logarithmiques.
- kr : coefficient tenant compte du risque de calcul.
- kc : coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées de même type.
- k_s : coefficient minorant tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.
- kd : coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base.
- A : paramètre pris égal à 0,012 pour les chaussées à moyen et fort trafic ($T \geq T3$) et à 0,016 pour le cas contraire.

Les champs de contraintes et déformations induits par la charge de référence NE qui représente l'unité de mesure du trafic exprimé en nombre d'essieu standard de 13 tonnes, sont déterminés à la base de chaque couche selon le modèle multicouche de (BURMISTER, 1943) qui est fondé sur le module élastique, le coefficient de poisson et les contraintes de traction des matériaux de structure de chaussée en utilisant le code de calcul ALIZE qui est un logiciel de dimensionnement de structures de chaussée. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées avec celles des valeurs admissibles calculées des matériaux constitutifs de la structure de chaussée fixées suivant un catalogue de dimensionnement des structures.

IV.6.3. APPLICATION DU DIMENSIONNEMENT

Le présent projet d'étude qui concerne l'application de la technique de l'amélioration de sol traité aux liants hydrauliques, consistera à faire un dimensionnement dans les conditions réelles du projet selon le LCPC (1994). Les matériaux de chaussées retenus sont entre autres :

- pour le revêtement de la chaussée, l'on opte pour le mortier Bitumineux. Il sera mis en œuvre sur une épaisseur de 4 à 5 cm.

- la couche de base en grave-ciment ;

- la couche de fondation en sol traité aux liants hydrauliques ;

L'étude du trafic a été faite sur la base de vingt (20) ans correspondant à la durée de vie de l'ouvrage. Celle-ci tient compte d'une croissance linéaire de 6% du trafic. Le trafic étant estimé à 124 PL/J dans les deux sens et 62 PL/J/sens. Le trafic cumulé poids lourds en Nombre d'Essieux standard (NE) est de $7,1.10^5$ PL en considérant le nombre d'essieux équivalent de 13 tonnes.

Le trafic cumulé poids lourds NE correspond à la classe T2 du CEBTP (1984). Car se trouvant entre $5. 10^5$ - $1,5. 10^6$. La recommandation donne le risque de calcul (r) pris est égal à 7,5%. Tous ces paramètres sont donnés par les guides de dimensionnement des chaussées (LCPC, 1994).

Les calculs se feront à deux niveaux :

D'abord par la méthode empirique en utilisant la méthode CEBTP : pour pré-dimensionner la structure de chaussée c'est à dire fixer l'épaisseur et ensuite faire une vérification de cette structure par la méthode rationnelle en utilisant le logiciel ALIZE-LCPC.

1) Méthode CEBTP (1984)

La méthode CEBTP est basée sur l'exploitation du guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux édité par le Ministère français de la coopération et réalisé par le CEBTP en collaboration avec des laboratoires nationaux de différents pays. Trois principaux paramètres sont à prendre en compte pour fixer l'épaisseur ou la structure de chaussée. Ce sont :

- premièrement, la portance du sol support de plate-forme ;
- deuxièmement, la classe du trafic ;
- et troisièmement, la nature des matériaux de chaussée.

2) Vérification par le code de calcul ALIZE du LCPC

Le code de calcul ALIZE du LCPC est largement utilisé pour le dimensionnement et la vérification des structures de chaussées. Il permet de calculer les contraintes et les déformations induites dans les différentes couches de la chaussée fixées. L'on vérifie en déformation lors qu'on utilise un liant hydrocarboné pour traiter la matière première et en contrainte pour matériaux traités aux liants hydrauliques. La charge prise en compte est une charge unitaire correspondant à un demi-essieu de 13 tonnes représenté par une empreinte circulaire de la figure 23 ci-après (LCPC, 1994).

Les données à rentrer dans le modèle pour les différentes simulations sont ci-après :

- épaisseurs de chaque couche ;
- modules de Young (E) ;
- coefficients de poisson (ν) de chaque couche y compris le sol support ;
- types d'interface entre les couches (conditions de collage).

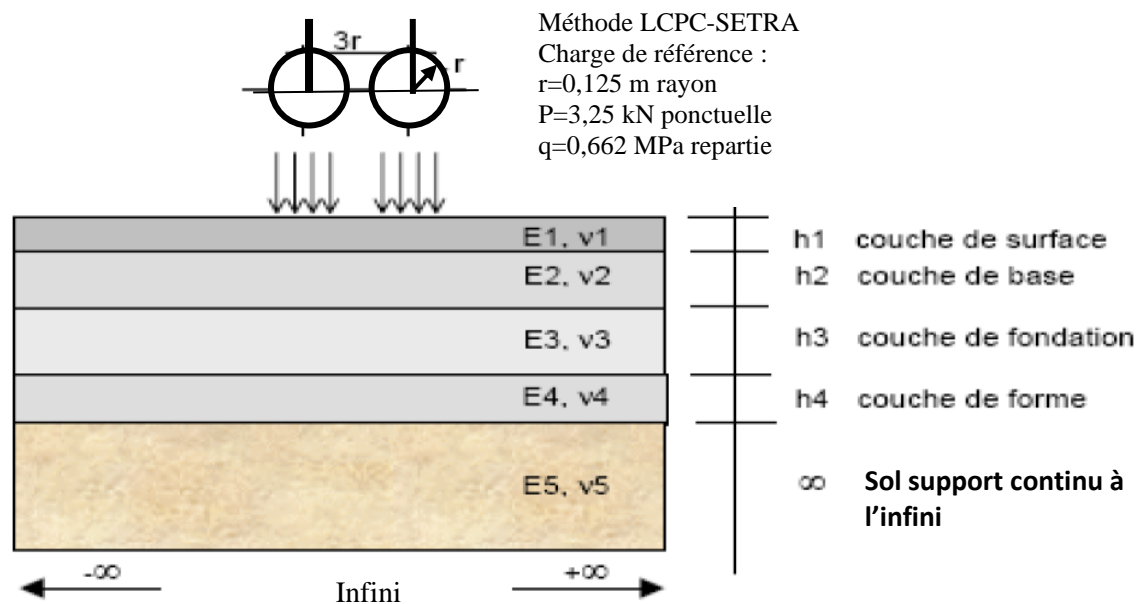


Figure 23 : Moteur de calcul ALIZE (LCPC, 1994).

3) Les hypothèses

D'après le modèle géotechnique, l'on adopte les valeurs des contraintes de traction, les modules de Young (E) et les coefficients de poisson donnés par le tableau XVI ci-après.

Tableau XVI : Valeurs des contraintes et déformations admissibles des différents matériaux de couche de chaussée.

Nature de matériau n°j quelconque	Définition de Surface max _j quelconque
Matériau hydrocarboné	Valeur de la déformation d'extension horizontale maximale ϵ_{tmaxj} du matériau j
Matériau traité au liant hydraulique et béton	Valeur de la contrainte de traction horizontale maximale σ_{tmaxj} du matériau j
Matériau non traité et sol	Valeur de déformation de compression verticale maximale σ_{tmaxj} du matériau j

4) Les vérifications à faire

Les vérifications à effectuer à ce stade de calcul concernent les critères de ruptures que sont :

- la déformation verticale ϵ_t à la surface du sol support qui doit être inférieure à la déformation admissible ϵ_t admissible : $\epsilon_t \leq \epsilon_t \text{ adm}$;
- la déformation verticale ϵ_z à la surface du sol support qui doit être inférieure à la déformation admissible ϵ_z admissible : $\epsilon_z \leq \epsilon_z \text{ adm}$.

CONCLUSION PARTIELLE

Les travaux ont été menés au laboratoire dans le but de déterminer les caractérisations physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des sols prélevés dans les localités de la région géotechnique R1 du sud de la Côte d'Ivoire.

Les essais géotechniques décrits, dans ce chapitre, ont pour objectif l'estimation des paramètres permettant une meilleure compréhension de l'aptitude des sols en construction routière. De plus, ils permettent d'identifier et de classer ces sols selon un système de classification défini suivi de recommandation.

Ces essais fournissent des informations sur la granulométrie, la plasticité, l'argilosité et la capacité portante de ces sols. Les propriétés géotechniques des sols déduites des essais ont été interprétées en référence aux valeurs seuils de recommandations dans le guide pratique de dimensionnement des chaussées en Afrique tropicale.

Ce document, établi par le CEBTP (1984) est actuellement utilisé comme guide de dimensionnement des chaussées dans bon nombre de pays d'Afrique.

Les essais œdométriques sont effectués pour caractériser les coefficients de gonflement volumique de sols remaniés afin d'apprécier, selon les normes, l'aptitude du sol au traitement. Par ailleurs, les méthodes de dimensionnement du CEBTP (1984) ; modèle empirique et du LCPC (1994) ; modèle rationnel basé sur le logiciel ALIZE, sont utilisées pour modéliser le dimensionnement d'une assise de chaussée faite à base de sol argileux traité aux mélanges de liants hydrauliques.

**TROISIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET
DISCUSSION**

TROISIEME PARTIE : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET DISCUSSION

CHAPITRE V. CARACTERISATION DES SOLS REMANIES DE GRAND-LAHOU, SONGON, SAMO ET BINGERVILLE

Dans le chapitre V, l'on analysera les résultats des essais de caractérisation effectués sur la matière première à partir des éprouvettes confectionnées à cet effet.

V.1. CARACTERISATIONS PHYSIQUES DES SOLS DE GRAND-LAHOU, SONGON, SAMO ET BINGERVILLE A L'ETAT NATUREL

V.1.1. GRANULOMETRIES

Les résultats des analyses granulométriques effectuées sur les quatre (4) sols remaniés sont présentés à la figure 24 ci-dessous. Il s'agit des sols remaniés de Grand-Lahou, Songon, Samo et Bingerville.

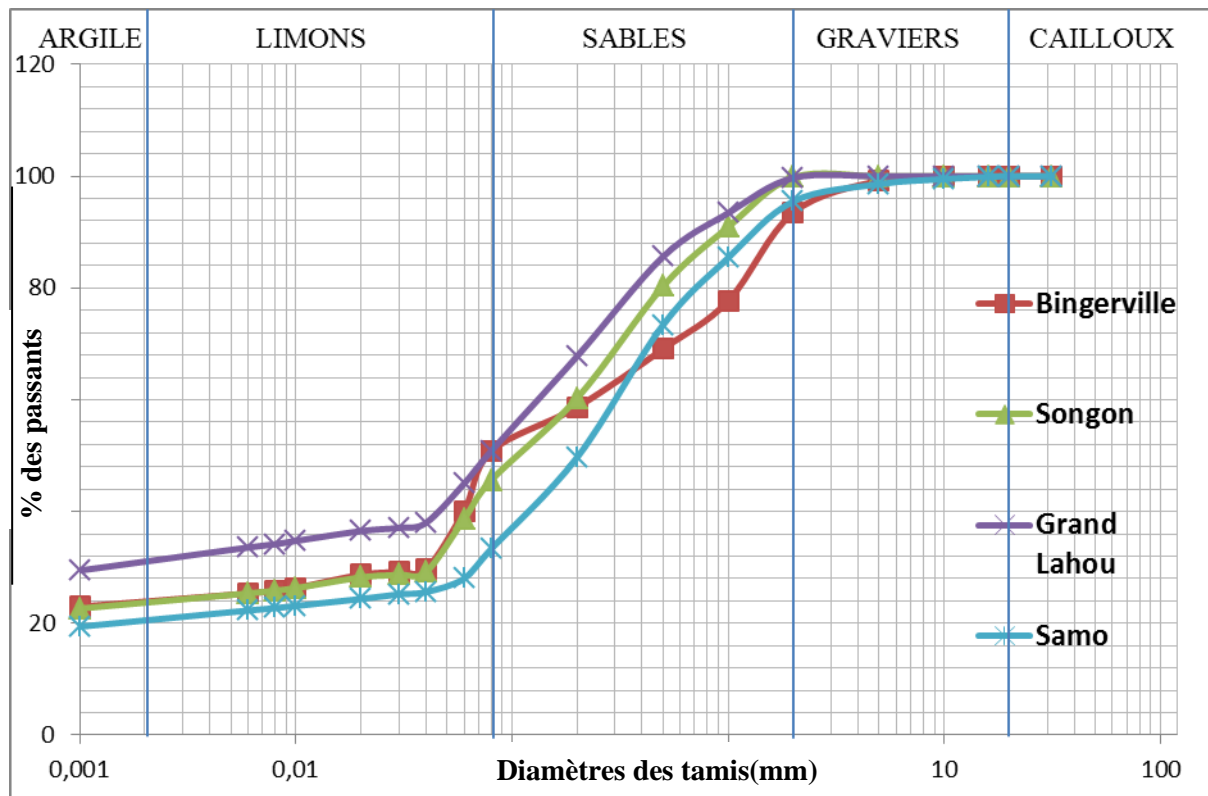


Figure 24 : Courbes granulométriques des sols remaniés de Bingerville, Songon, Grand-Lahou et Samo.

La figure 24 ci-dessus, montre que les sols de Grand-Lahou et de Songon, sont constitués de deux catégories de grains à savoir :

- les grains de la fraction fine (argiles et limons), particules dont le diamètre est inférieur à 80 μm ,
- les grains de la fraction grossière (sables et graviers), particules dont le diamètre est entre 80 μm et 20 mm

Par contre, les sols de Bingerville et de Samo, en plus de la fraction fine (argile et limon) et de la fraction grossière sable, contiennent quelques particules de graves c'est-à-dire des particules dont le diamètre est supérieur à 2 mm.

Les valeurs des proportions de ces catégories de grain sont présentées dans le Tableau XVII ci-dessous.

Tableau XVII : Valeurs des proportions des catégories de grain des sols remaniés de l'étude.

		Composition en particules de grains (%)			
Fraction		Bingerville	Songon	Samo	Grand-Lahou
Grossière	Grave ($2 \text{ mm} < \Phi < 50 \text{ mm}$)	6±0,4	0	4±	0
	Sable ($80 \mu\text{m} < \Phi < 2 \text{ mm}$)	44±0,2	56±0,2	62±0,2	50±0,2
Fine	Limon ($2 \mu\text{m} < \Phi < 80 \mu\text{m}$)	26±0,3	20±0,3	14±0,4	20±0,4
	Argile ($< 2 \mu\text{m}$)	24±0,3	24±0,3	20±0,3	30±0,3

Le tableau ci-dessus montre que les sols de Grand-Lahou et de Songon ne contiennent pas de graves mais ont plutôt des proportions de sable respectivement de 50% et de 56% avec une matrice fine de 50% et de 44 %.

Cette matrice fine est composée de 20% de limon et 30% d'argile pour les sols de Grand-Lahou et de 20% de limon et 24% d'argile pour les sols de Songon. Les sols de Songon et Grand-Lahou s'identifieraient comme des sables argileux peu limoneux.

Par contre, les sols de Bingerville et de Samo contiennent respectivement 6% et 4% de graves plus 44% et 56% de sables emballés dans des matrices fines de 26% de limon et 24% d'argile pour les sols de Bingerville et de 14% de limon et 20% d'argile pour les sols de Samo ce qui suggère que les sols de Bingerville seraient des sables limoneux argileux avec trace de grave que sont les particules de diamètre supérieur à 2 mm et que les sols de Samo pourraient être des sables argileux limoneux avec trace de grave.

Les sols de Bingerville et Grand-Lahou ont des fractions fines (limon et argile) les plus élevées avec des proportions de 50% supérieures à celles de Songon 44 % et Samo 34%.

Les sols de Samo conduiraient à des produits plus compactés avec une fraction grossière (sable et grave) de 66% que ceux des sols de Bingerville composés de (sable et grave) 50%, Songon avec seulement 56% de sable de même que ceux de Grand-Lahou avec 50% de sable.

Les sols de Samo pourraient être moins sensibles à l'eau, car ils possèdent une importante proportion en éléments grossiers 4% de grave et 62% de sable soit 66% par rapport aux autres sols qui présentent des proportions respectives de 50% pour les sols de Grand-Lahou, 56% pour les sols de Songon et 50% pour les sols de Bingerville.

Par contre, les sols de Grand-Lahou, Bingerville et Songon ont les plus fortes proportions en argile respectivement de 30% et 24% par rapport aux sols de Samo qui ont 20% en proportion d'argile. Ces trois premiers sols peuvent retenir plus d'eau que celui de Samo.

En outre, les sols de Samo sont les plus denses du point de vue granulométrique par rapport aux trois autres sols dans la mesure où ces sols, en dehors du limon et de l'argile, contiennent majoritairement des particules de diamètre compris entre 80 μm et 20 mm soit (66% de sable et de grave).

Ces particules contribuent à la mise en place du squelette des sols, donc, à leurs résistances. Les sols de Samo conduiraient à des produits plus résistants.

Cette résistance décroît pour les sols de Grand-Lahou suivie des sols de Bingerville et ceux des sols de Songon.

Cette caractérisation des sols à travers la répartition des différents grains constitutifs va conduire à l'identification de ces quatre différents sols naturels remaniés dans le triangle textural de Casagrande avec les résultats ci-après (Figure 25).

Les résultats de l'identification des sols dans le triangle textural de Casagrande montrent que les sols de Samo et de Songon sont des sables argileux (SA) tandis que ceux de Bingerville sont des Limon Sablo Argileux (LSA) et ceux de Grand-Lahou sont des limons argilo sableux (LAS).

Le diamètre maximum des particules de tous ces sols est inférieur à 50 mm, ce sont des sols qui appartiennent à la classe A (GTR, 2014).

Suivant cette même classification et, en tenant compte des passants au tamis de 80 μm , les sols de Bingerville, de Songon et de Grand-Lahou pourraient appartenir aux sous-classes A1, A2, A3, A4 car leurs proportions en fines sont supérieures à 35%.

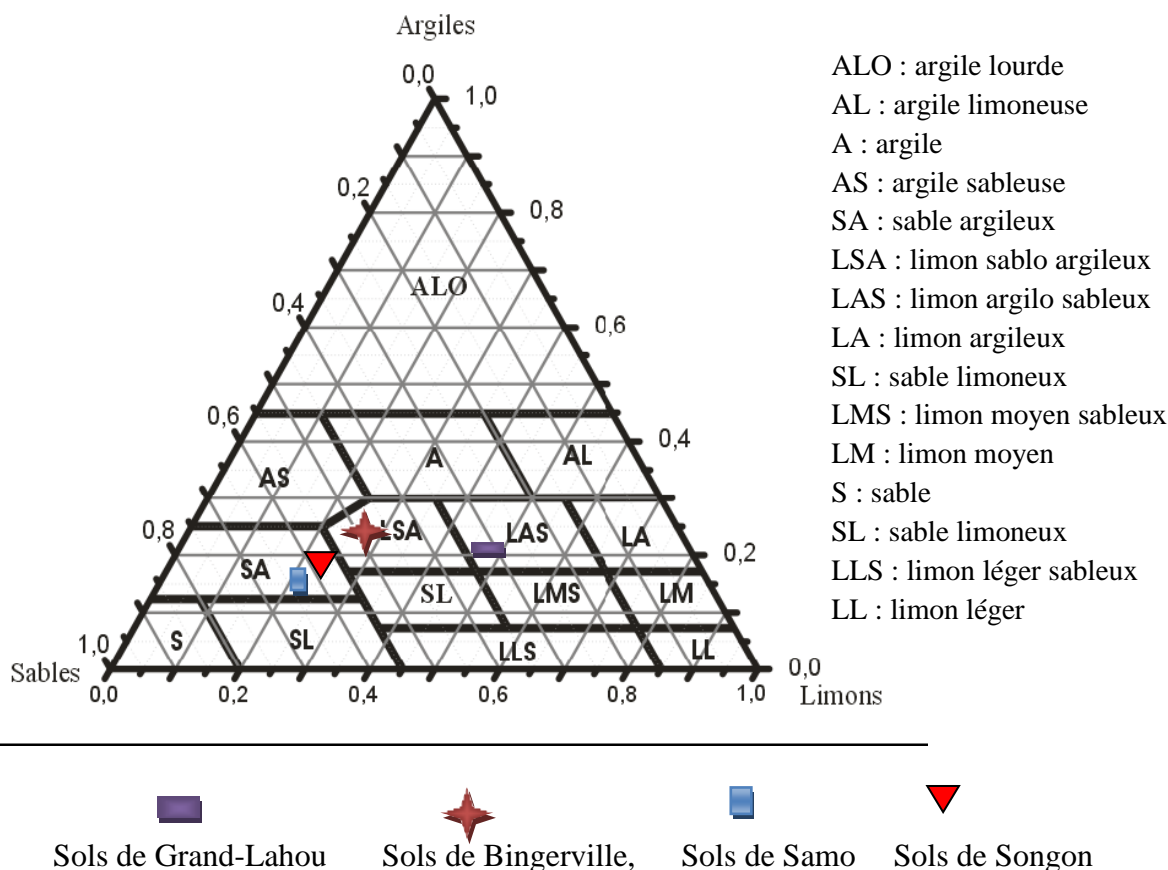


Figure 25 : Résultat de l'identification des différents sols remaniés de l'étude dans le triangle textural de Casagrande (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997).

Par contre, selon ce Guide de recommandation, les sols de Samo avec des proportions de fine comprises entre 12% et 35 % pourraient appartenir à la classe B5 et B6.

Comme tous les sols contiennent plus de 50% d'éléments grossiers c'est-à-dire de sable, ils appartiennent donc à la famille des sols grenus (GTR, 2014).

V.1.2. TENEUR EN EAU ET ETAT DE PLASTICITE DES SOLS REMANIES

Cette caractérisation va permettre de déterminer les limites d'Atterberg. Les limites d'Atterberg mesurées sur les sols de Bingerville, de Songon, de Samo et de Grand-Lahou ont donné des résultats de l'état de plasticité des différents sols présentés dans le tableau XVIII ci-après.

Lorsque l'on a déterminé la teneur en eau naturelle, les échantillons sont séchés à l'air libre. Les résultats obtenus de ces essais ont permis de déterminer les caractéristiques de plasticité des sols. L'essai réalisé sur les différents sols selon le mode opératoire de la norme française

NF P 94-051, (1993) a permis d'évaluer la limite de liquidité (WL), la limite de plasticité (WP) et l'indice de plasticité (IP).

Les valeurs moyennes des résultats de ces essais sont résumées dans le tableau XVIII ci-dessous. L'analyse du tableau XVIII permet de constater que les valeurs de limite de liquidité sont moyennement dispersées $46,2\% < WL < 48,6\%$, à l'exception des échantillons du site de Bingerville dont la valeur moyenne égale à $60,6\%$ est relativement élevée.

Les valeurs obtenues sur les sols de Songon, Samo, et Grand-Lahou sont faibles ($47,4\%$ en moyenne). La valeur la plus élevée de limite de liquidité ($WL = 60,6\%$) est obtenue pour le site de Bingerville.

Concernant la limite de plasticité, la dispersion est également faible et les valeurs varient entre 23 et 24% ; le site de Songon présente une valeur moyenne légèrement élevée, soit WP égale 29,3%. Cependant, l'on note une valeur de 36,9 % pour le site de Bingerville.

Contrairement aux paramètres WL et WP, l'indice de plasticité IP varie dans un relativement petit intervalle d'un site à l'autre avec des valeurs moyennes comprises entre 19,3 et 23,7% ci-dessous (Tableau XVIII). L'Indice de Plasticité (IP) au-delà de 12% cela suggère que ces sols peuvent faire l'objet d'un traitement et mieux d'un traitement approprié mixte à la chaux et ciment (GTS, 2015 ; ABDO, 2008).

Tableau XVIII : Valeurs des limites d'Atterberg des différents sols remaniés de l'étude.

Sols des localités	WL	WP	IP
Bingerville	60,6±0,6	36,9±0,4	23,7±0,2
Songon	48,6±0,4	29,3±0,5	19,3±0,5
Samo	46,2±0,7	23,2±0,3	23,0±0,2
Grand-Lahou	47,4±0,5	23,9±0,4	23,5±0,2

Les résultats de cette caractérisation seront utilisés dans le diagramme de Casagrande. En effet, la projection des valeurs des limites d'Atterberg dans le diagramme de plasticité de Casagrande est donnée sur la figure 26 ci-après. Elle renseigne sur la nature de l'argile dans les différents sols étudiés.

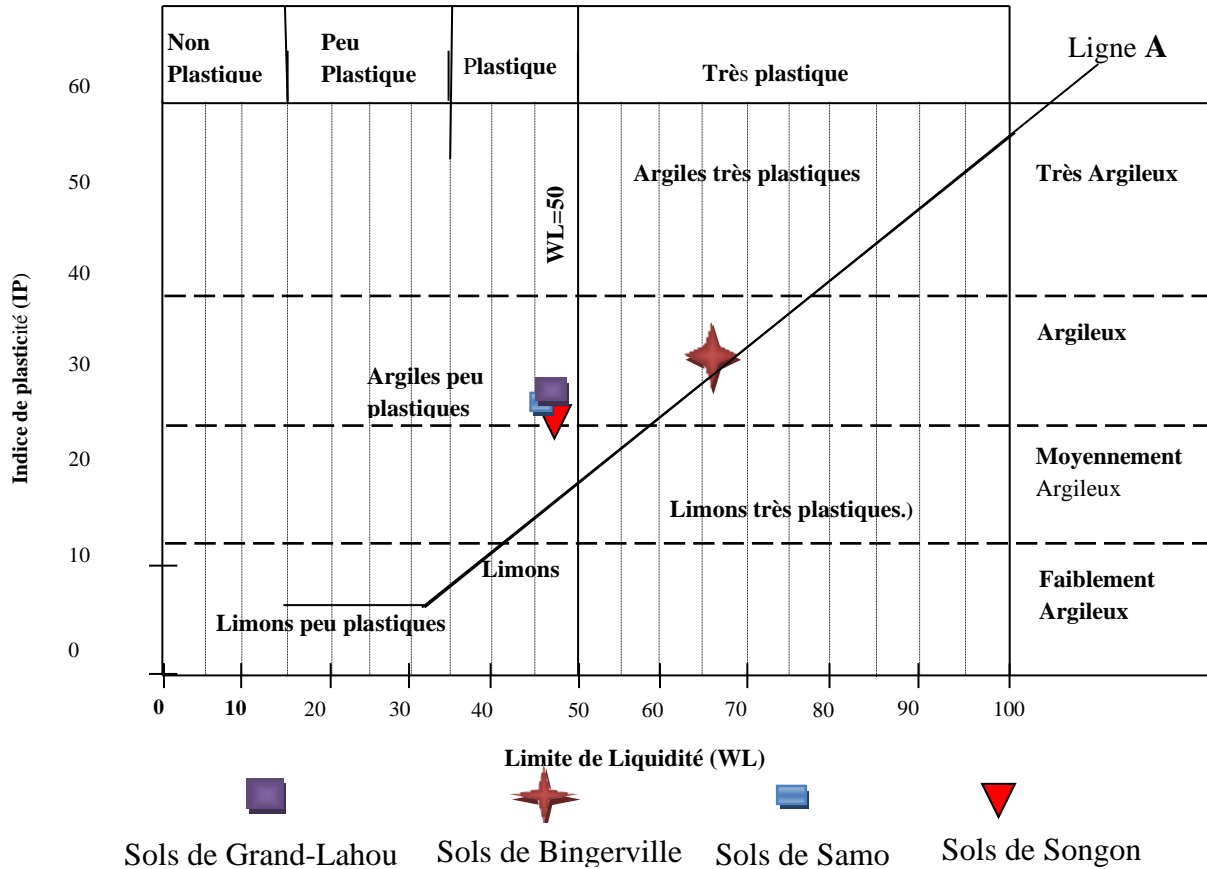


Figure 26 : Position des différents sols remaniés sur le diagramme de plasticité de Casagrande (PHILIPPONNAT & HUBERT, 1997).

Lorsque l'on positionne les différents sols sur le diagramme de plasticité de Casagrande, il apparaît que : les sols étudiés sont en général au-dessus de la ligne A, ce qui signifie qu'ils sont tous de nature argileuse mais à des degrés différents. Les sols de Bingerville, de Grand-Lahou, de Samo et de Songon sont de nature argileuse peu plastique ci-dessus (Figure, 26).

La prise en compte de l'indice de plasticité pour la classification des différents sols indique que les sols de Bingerville, Grand-Lahou et Songon appartiennent à la classe A, notamment à la sous-classe A2 et ceux des sols de Samo sont de la sous-classe B6. Les sols sont des sols de nature argileuse très plastique à plastique (GTR, 2014).

Par contre, selon la classification du les sols de Bingerville, Grand-Lahou, Songon et Samo ne peuvent être utilisés à l'état naturel ni comme couche de fondation ni comme couche de base de route compte tenu de leur état de plasticité (LBTP, 1997).

V.1.3. CAPACITE D'ABSORPTION IONIQUE DES SOLS REMANIES

Les valeurs des résultats de l'essai au bleu de méthylène qui caractérise la capacité d'absorption ionique dans les quatre sols remaniés obtenues sont présentées dans le tableau XIX ci-dessous.

Tableau XIX : Valeurs de l'essai au bleu de méthylène des différents sols remaniés de l'étude.

Sols des localités	valeur capacité d'absorption ionique
Bingerville	0,4±0,03
Songon	0,5±0,02
Samo	0,2±0,02
Grand-Lahou	0,6±0,02

Pour mieux comprendre la matière première, à l'observation du tableau XIX ci-dessus, les valeurs au bleu de méthylène des sols de Bingerville, Grand-Lahou, Songon et Samo sont comprises entre 0,2 et 0,6. Ces sols correspondent tous à des sols sablo-limoneux plastiques selon le GTR (2014). Et cette compréhension se poursuit avec d'autres caractérisations telles :

V.1.4. CARACTERISTIQUE DE COMPACTAGE DES SOLS REMANIES

Les résultats de compacité déductibles de l'essai Proctor modifié des sols des localités sont présentés sur la figure 27.

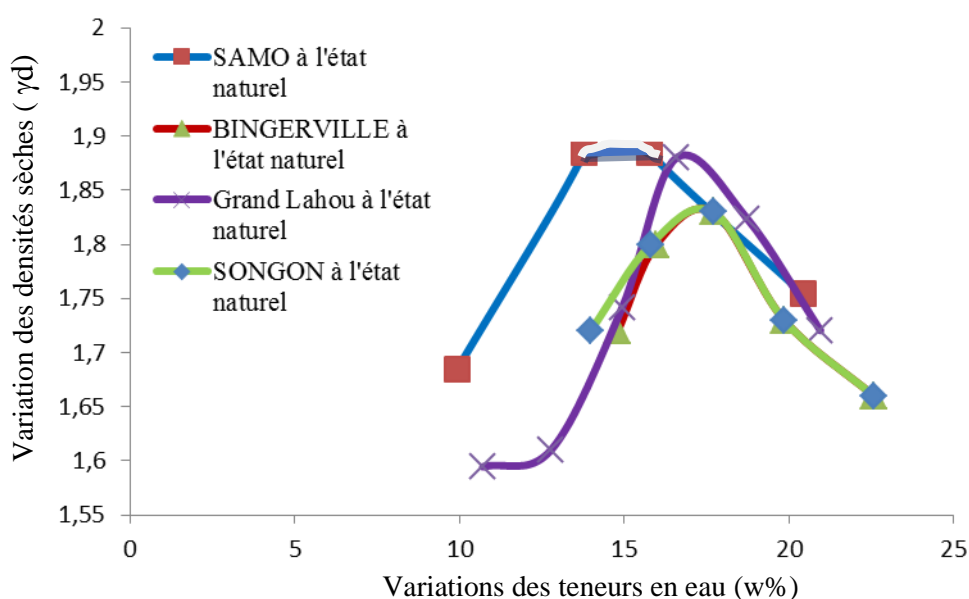


Figure 27 : Résultats des Proctor modifiés des différents sols remaniés de l'étude.

La figure 27 précédente qui donne les résultats des Proctor modifiés des différents sols de l'étude montre que la densité sèche varie en fonction de la teneur en eau dans le sol et passe par un pic correspondant à l'Optimum Proctor Modifié pour 55 coups de la dame représentée sur la (Figure 11D) précédente. Les résultats des valeurs de l'optimum Proctor modifié pour les différents sols remaniés sont inscrits dans le Tableau XX.

Tableau XX : Valeurs de l'optimum Proctor modifié des différents sols remaniés.

Sols des localités	Teneur en eau Naturelle (W_n) (%)	Densité sèche (γ_{dOPM})	Teneur en eau optimale (W_{OPM}) (%)
Bingerville	7,26±0,2	1,83	16,58±0,2
Songon	8,70±0,2	1,83	17,70±0,2
Samo	5,70±0,1	1,89	14,32±0,1
Grand-Lahou	5,58±0,2	1,88	16,02±0,2

Les sables argileux de Samo et Grand-Lahou ont des densités sèches les plus élevées, respectivement de 1,89 et 1,88 tandis que ceux de Bingerville et Songon ont de faibles densités sèches, qui sont de 1,83 chacun.

En effet, les densités sèches élevées des sols de Samo et de Grand-Lahou s'expliqueraient par leur grande quantité de sable (constituant le squelette du sol), ce qui confirme relativement leurs faibles teneurs en eau optimales respectivement de 14,32 et 16,02% contrairement aux sols de Bingerville et de Songon qui ont des teneurs en eau les plus élevées respectivement de 16,58 et 17,7%. Cela explique leurs taux élevés de particules fines. Toutes ses densités sèches restent inférieures à 1,9 et à 2 par comparaison à la norme. Regardons cependant les portances de ces différents sols remaniés.

V.1.5. PORTANCE DES SOLS REMANIES

Les représentations graphiques des essais CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des différents sols remaniés sont présentées sur la figure 28 ci-après.

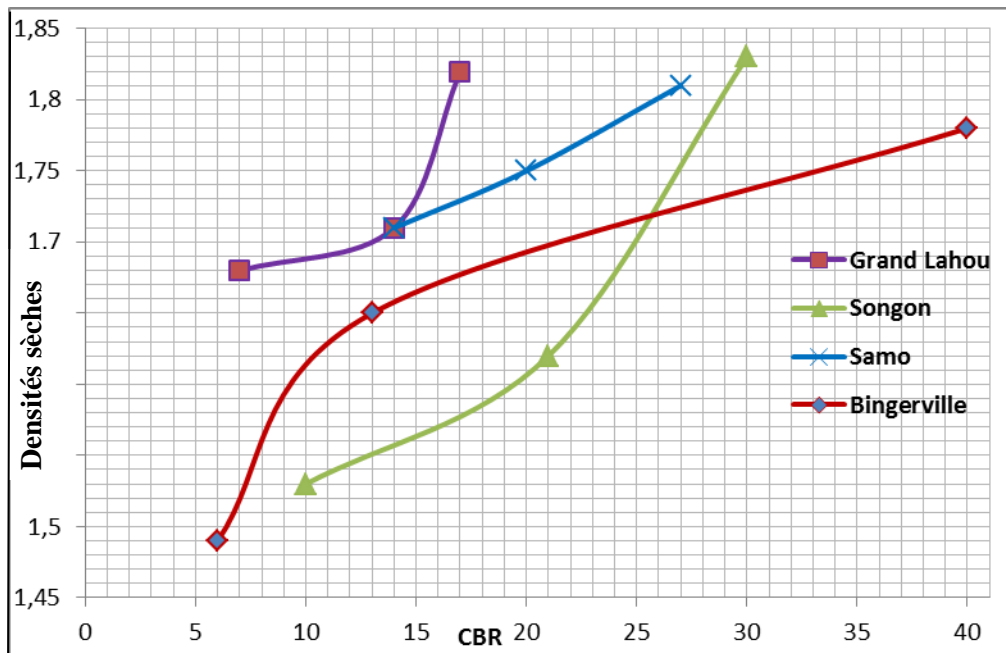


Figure 28 : CBR à 95% de L'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des différents sols remaniés de l'étude.

A l'observation de la figure 28 ci-dessus, l'on remarque que les valeurs de CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau varient en fonction du type de sol et du degré de compactage. Le tableau XXI ci-après présente les résultats des valeurs de CBR des différents sols remaniés étudiés.

Les sols de Songon et de Samo ont les valeurs de CBR à 95% de l'optimum Proctor modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau les plus élevés respectivement (21 ; 20), alors que ceux de Bingerville et de Grand-Lahou ont, respectivement, les valeurs de CBR faibles à 95 % de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau (13 ; 14). Cela pourrait s'expliquer par leurs différentes répartitions des grains liées aux diamètres c'est-à-dire à la granulométrie. L'on constate que les quatre sols ont des portances à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau inférieur à 30 comparativement aux normes pour leur utilisation en assise de chaussée.

Ces différents sables argileux contiennent une grande proportion d'éléments fins (limon et argile).

En réalité, la propriété recherchée pour la construction d'une route durable est l'aptitude des matériaux à supporter les charges transmises par le trafic, c'est-à-dire leur indice portant CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion.

Tableau XXI : Valeurs des CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des différents sols remaniés de l'étude et leur utilisation sous trafic.

Sol remanié	CBR à 4j	Utilisation à l'état naturel	Pour type de trafic
	95%OPM		
Bingerville	14±0,5	Couche de plateforme	Pas défini
Samo	20±0,5	Couche de forme	T1
Songon	21±0,5	Couche de forme	T1
Grand-Lahou	13±0,5	Couche de plateforme	Pas défini

V.1.6. COEFFICIENT DE GONFLEMENT VOLUMIQUE ET APTITUDE AU TRAITEMENT DES SABLES ARGILEUX

Le Tableau XXII ci-dessous, donne les valeurs des résultats des paramètres œdométriques caractéristiques de l'indice des vides (e_o), de la contrainte de pré-consolidation (σ_p') et le coefficient de gonflement volumique (C_g) des sables argileux des quatre sites.

Et la figure 29 ci-après, donne les courbes de compressibilité des sables argileux de Bingerville, Samo, Grand-Lahou et Songon qui ont permis de déterminer graphiquement les paramètres œdométriques des sables argileux sur le tableau XXII.

Tableau XXII : Valeurs des paramètres œdométriques et de gonflement volumique des sables argileux étudiés.

Sables argileux	Indice des vides e_o	Contrainte de pré-consolidation (σ_p') kN/m ²	Coefficient de gonflement volumique (C_g) kN/m ² (10 ⁻³)
Grand-Lahou	0,74±0,1	1,7±0,1	4,8±0,1
Songon	1,06±0,1	1,8±0,1	2,7±0,1
Samo	0,64±0,1	2,3±0,1	5,3±0,1
Bingerville	1,06±0,1	1,7±0,1	1,2±0,1

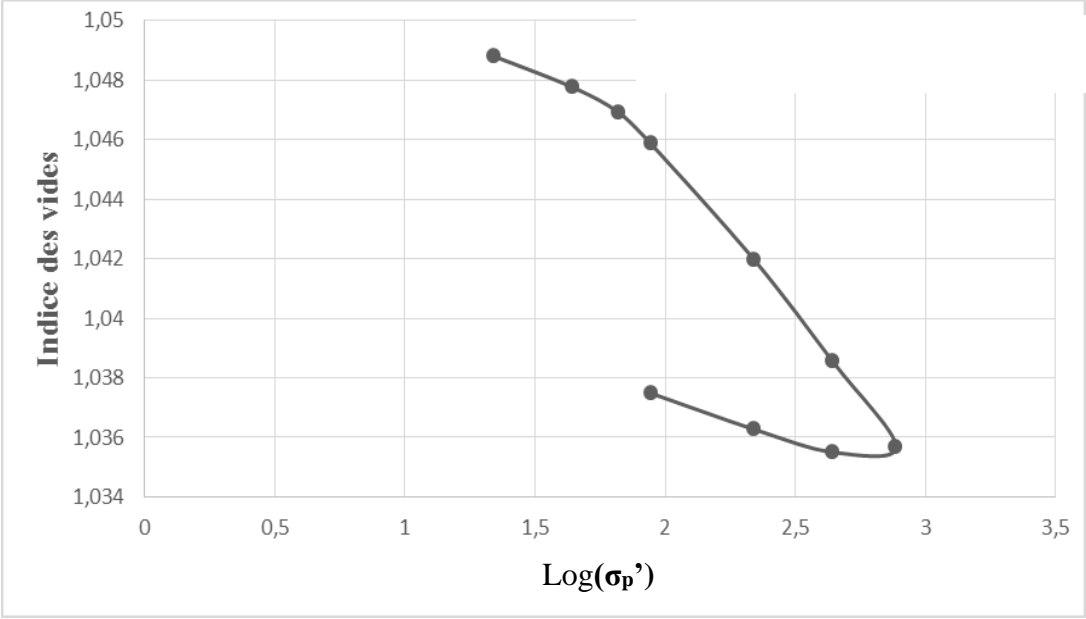
Sur le tableau XXII ci-dessus, l'on remarque que les coefficients de gonflement volumique C_g sont faibles dans l'ensemble des quatre sols remaniés étudiés avec des valeurs qui partent de $1,2 \cdot 10^{-3}$ à $5,3 \cdot 10^{-3}$ kN/m².

Les différentes classifications basées sur les caractéristiques d'identification montrent que cette argile est caractérisée par un potentiel de gonflement volumique très peu élevé ; le gonflement volumique étant en partie dû à la structure minéralogique des sols (teneur élevée

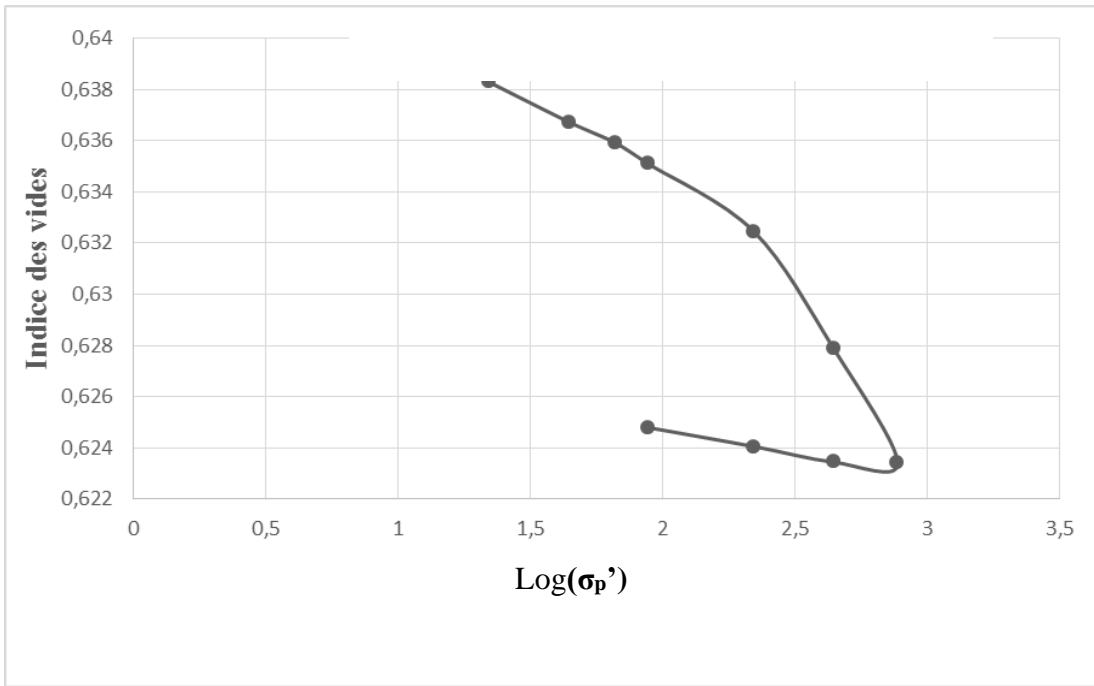
en argile de type montmorillonite) et aux variations de leur teneur en eau. Ceux-ci pourraient être caractéristiques d'une fraction argileuse de type non gonflante de la matrice fine.

Par ailleurs, Les coefficients de gonflement volumique C_g de $1,2 \cdot 10^{-3}$ à $5,3 \cdot 10^{-3}$ sont largement inférieurs à 5 comparativement à la norme, c'est à dire ($1,2 \cdot 10^{-3}$; $2,7 \cdot 10^{-3}$; $4,8 \cdot 10^{-3}$ et $5,3 \cdot 10^{-3}$) < 5 . Les coefficients de gonflement volumique inférieures à 5, traduisent l'aptitude des sables argileux à être traités aux liants hydrauliques.

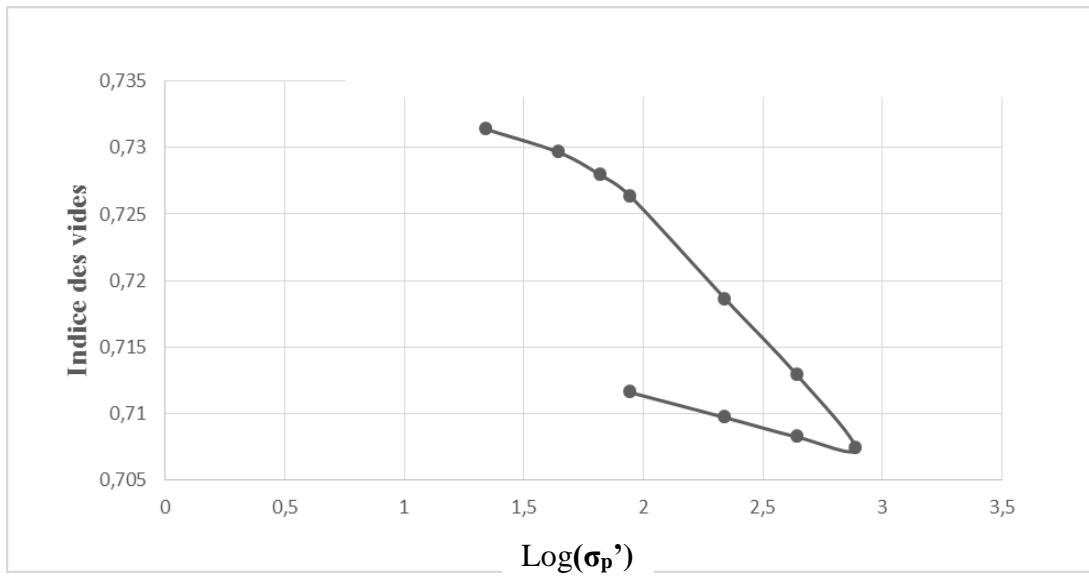
La figure 29 ci-après permet de déterminer les paramètres œdométriques des différents sols argileux de Songon, Bingerville, Grand-Lahou et Samo pour ce qui concerne les paramètres de gonflement volumique et de compressibilité. De ce qui précède, cette figure montre dans l'ensemble que ces sables argileux sont très plastiques et sont fortement surconsolidés, peu perméables et très peu sensibles au fluage. Cette surconsolidation semble être due au phénomène de retrait résultant d'une dessiccation plus ou moins poussée.



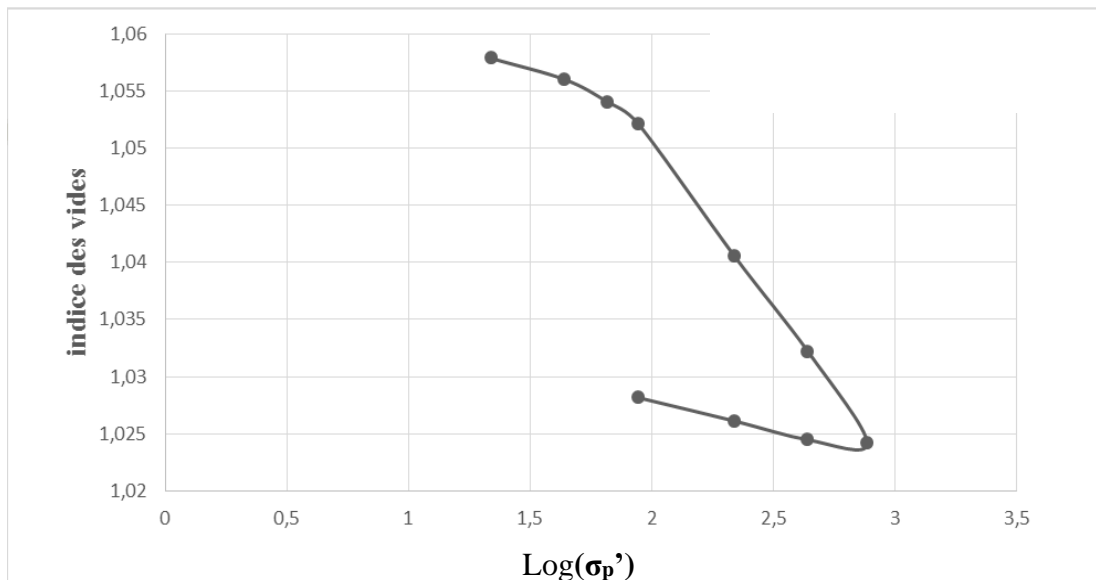
1) Courbe de compressibilité des sables argileux de Bingerville,



2) Courbe de compressibilité des sables argileux de Samo,



3) Courbe de compressibilité des sables argileux de Grand-Lahou,



4) Courbe de compressibilité des sables argileux de Songon.

Figure 29 : Courbes de compressibilité des sables argileux de Bingerville, Samo, Grand Lahou et Songon.

V.2. CARACTERISATION CHIMIQUE DES SABLES ARGILEUX DE BINGERVILLE, SONGON, SAMO ET GRAND-LAHOU A L'ETAT NATUREL

V.2.1. TENEUR EN OXYDES

Les proportions des teneurs en oxydes réalisées sur les sables argileux de l'étude, broyés et rendus sous forme de poudre (diamètre compris entre 75 nm et 100 nm), sont consignées dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII : Proportion des teneurs en oxydes des différents sables argileux de l'étude.

Sables argileux	Proportion Massique des oxydes dosés				
	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% TiO ₂	%MgO
Bingerville	60,03±0,02	12,21±0,02	8,8±0,02	1,28±0,02	0,06±0,01
Songon	62,98±0,02	11,18±0,02	9,41±0,02	1,32±0,02	0,04±0,01
Samo	62,39±0,02	9,79±0,02	12,68±0,02	1,09±0,02	0,05±0,01
Grand Lahou	52,89±0,02	11,65±0,02	15,63±0,02	1,47±0,02	0,08±0,01

Ce tableau de proportion des teneurs en oxydes montre que les sables argileux de Bingerville, Songon et Samo sont plus enrichis en oxyde de silice (SiO₂) que les sables argileux de Grand-Lahou, mais moins enrichis en oxyde de fer (Fe₂O₃).

Les sols de Samo et de Grand-Lahou ont néanmoins des proportions en oxyde de fer élevées par rapport aux sols de Bingerville et de Songon.

La variation de la composition chimique de ces différents sols pourrait s'expliquer par les facteurs environnementaux qui exercent une influence sur le processus de latérisation notamment : le climat, (température, bilan hydrique), la topographie (érosion et drainage), la végétation (matière organique, bactéries, acides humiques, et les roches mères).

Ces sables argileux ont été prélevés dans la même zone climatique c'est à dire au Sud de la Côte d'Ivoire dans le bassin sédimentaire dans la partie nord de la faille des lagunes avec une forte pluviométrie alternée de temps ensoleillé ce qui pourrait conduire à cette variation dans les proportions des oxydes dans ses sols.

Ces différents sables argileux et/ou leurs roches-mères auraient, alors, subi les effets d'altération et d'oxydation qui auraient occasionné le lessivage de certains éléments chimiques, voire la baisse de leur concentration massique au profit de l'enrichissement d'autres tels que le silicium Si. Le dioxygène O₂ forme avec le silicium la silice qui est, généralement, le principal minéral des sables c'est-à-dire le quartz.

Cela, expliquerait donc la forte proportion de dioxyde de silicium SiO₂ des sables argileux étudiés qui reflèterait un important contenu en quartz.

Aussi, la coloration des sols du rouge au jaune ocre est un indicateur de différents degrés d'oxydation de ces différents sables argileux en l'occurrence l'oxydation du fer contenu dans les minéraux de ces sols tels que les oxydes et/ou hydroxydes de fer. Les valeurs du degré de latérisation des différents sables argileux déterminées par le rapport S/R sont présentées dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV : Valeurs du rapport S/R des différents sables argileux.

Sable argileux	Rapport S/R
Bingerville	2,18
Songon	6,23
Samo	5,93
Grand-Lahou	4,16

L'on remarque que ; tous les sables argileux présentent des rapports de S/R supérieur à 2 ce qui montre que d'Est-Ouest ou Ouest à l'est de la faille des lagunes, l'on établit que les oxydes de silice dominent les oxydes de fer ; et selon cette classification, ce sont des sables argileux étudiés non latéritiques. Il faut donc chercher la teneur en matière organique dans ces différents sols remaniés.

V.2.2. TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE

Le tableau XXV ci-dessous présente les résultats des valeurs des teneurs en matières organiques, dans les différents sables argileux de l'étude, exprimées en carbone organique total.

On remarque dans ce tableau que les valeurs du Carbone Organique Total (COT) des échantillons de sables argileux étudiés varient entre 0,10 et 0,15% en poids. Il ressort que, la teneur en matière organique est faible autrement dit, la quantité de matière organique est peu dans les sables argileux de Bingerville, Samo, Songon et Grand-Lahou.

Pour MESSOU (1980) et MILLOGO (2008), les sols retenus pour supporter un trafic et qui peuvent être traités aux mélanges liants hydrauliques doivent nécessairement avoir un taux de matière organiques < 1%, en poids, pour leur utilisation en couches d'assise de chaussée. Dans de telles conditions, les sables argileux de cette présente étude peuvent être traités aux mélanges liants hydrauliques comme l'atteste leur indice de plasticité précédant (Tableau XVIII) précédant.

Tableau XXV : Valeurs des teneurs en matières organiques des différents sables argileux.

Sols des localités	Teneur COT (% poids)
Grand Lahou	0,11±0,2
Samo	0,10±0,2
Bingerville	0,15±0,1
Songon	0,10±0,2

V.3. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES SABLES ARGILEUX DE SONGON, GRAND-LAHOU, BINGERVILLE ET SAMO

V.3.1. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE BINGERVILLE

L'analyse croisée des diffractogrammes de la fraction fine des sables argileux pour la fraction fine de Bingerville, révèle que les minéraux argileux sont composés majoritairement de kaolinite à 96% et d'une faible proportion d'illite à 4%, ci-dessous (Figure 30).

La kaolinite a été détectée par les pics observés aux distances réticulaires 7,1 Å (001) ; 3,55 Å (002) et 2,36 Å (003) sur les diffractogrammes des échantillons effectués au naturel et à l'éthylène-glycol et confirmée par l'absence de pics à ces mêmes distances sur le diffractogramme de la phase chauffée ci-après (Figure 31 et 32).

L'illite a été reconnue à partir des pics observés sur tous les diffractogrammes (Figure 31 et 32) aux mêmes distances réticulaires respectives 10 Å (001) ; 5 Å (002) et à 3,3 Å (003).

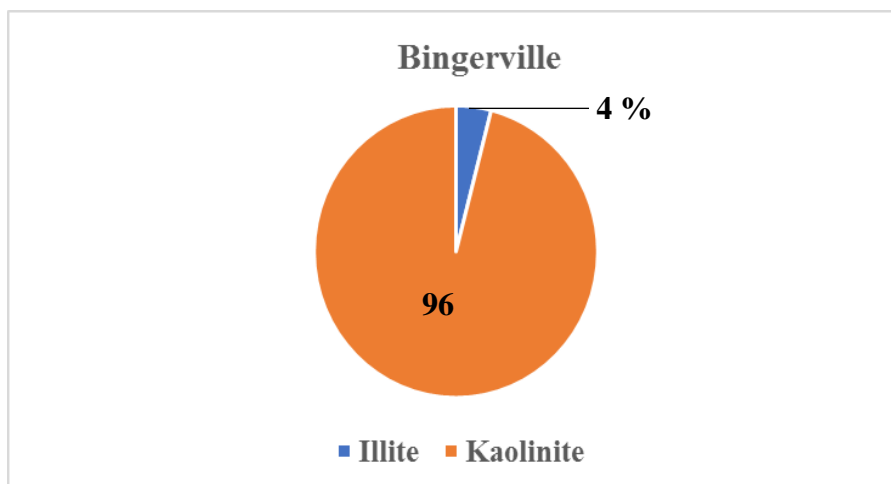


Figure 30 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville.

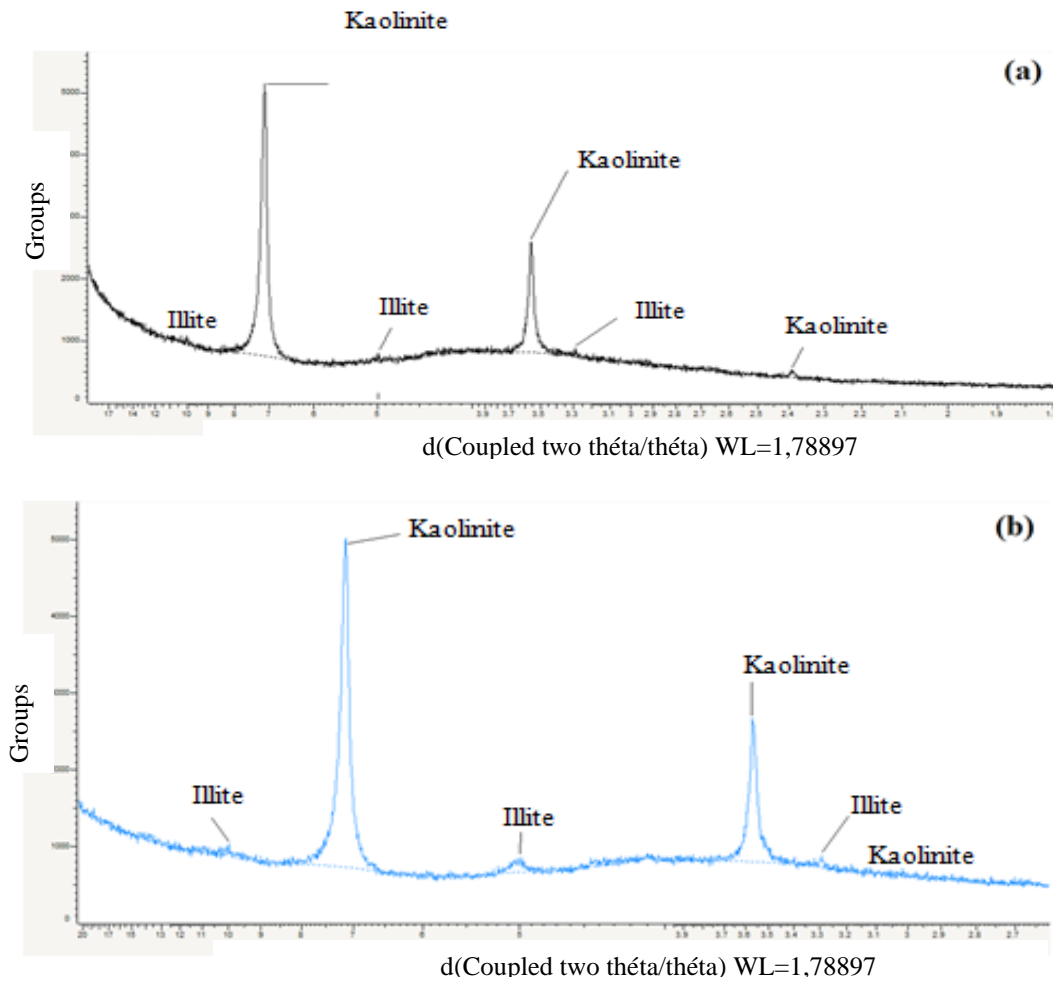


Figure 31 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville effectués sur lames normales (a) et glycolée (b)

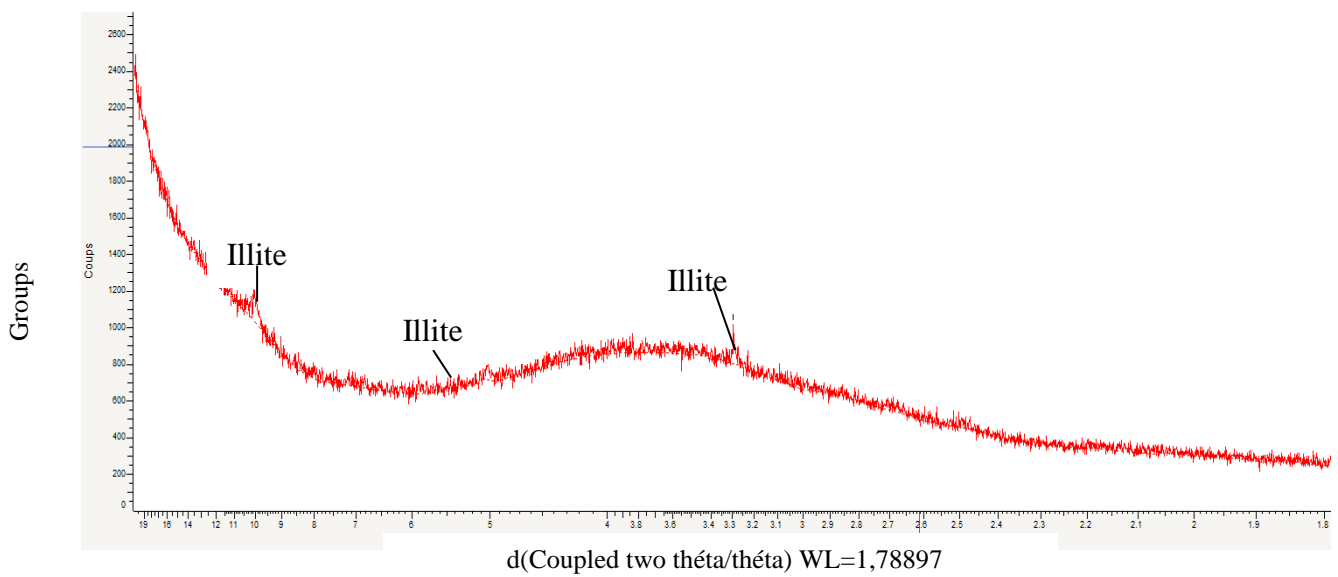


Figure 32 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Bingerville chauffée

V.3.2. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE SONGON

La minéralogie argileuse du sable argileux de Songon est dominée par la kaolinite avec une proportion de 95,4 % et une faible proportion d'illite de 4,6 % (Figure 33).

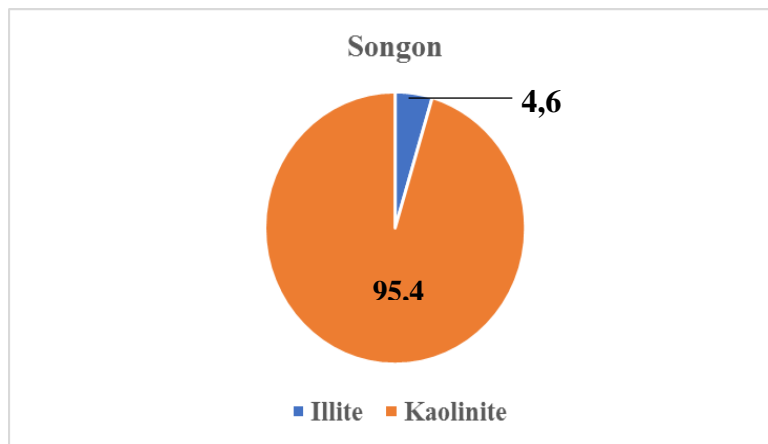


Figure 33 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon.

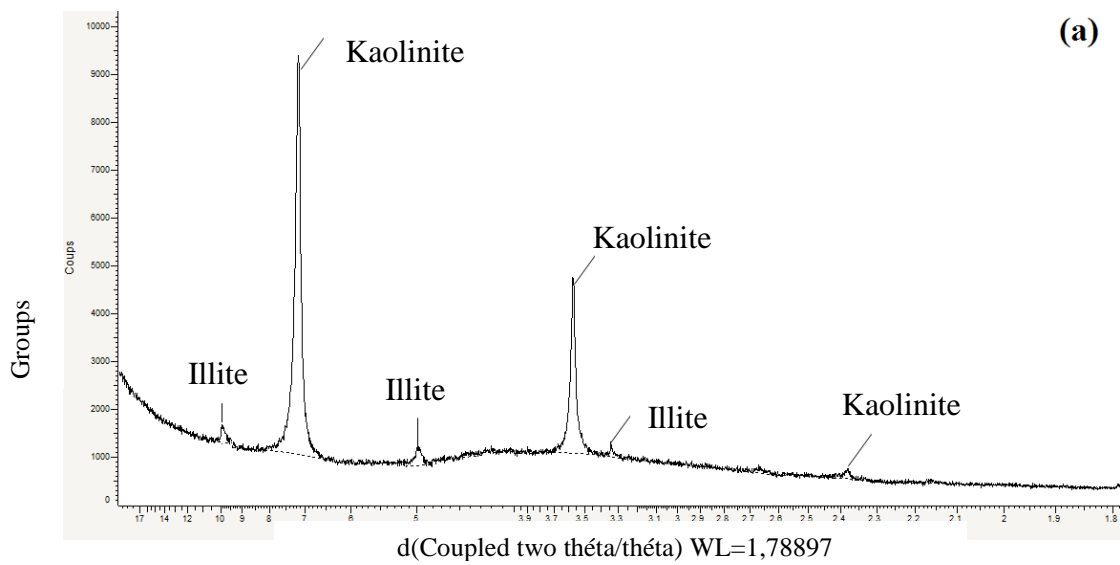
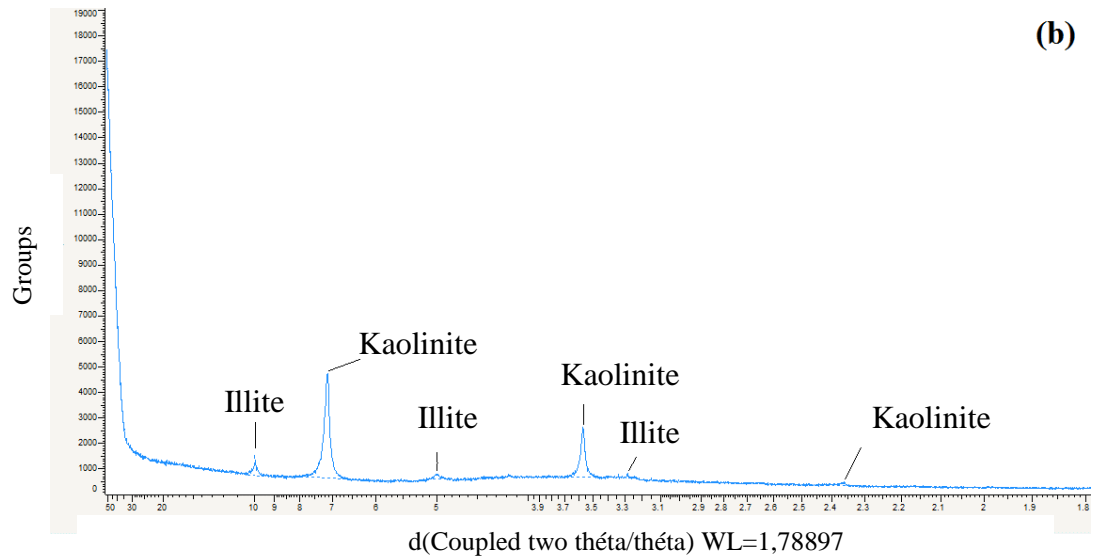


Figure 34 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon effectués sur lames normales (a) et glycolée (b).

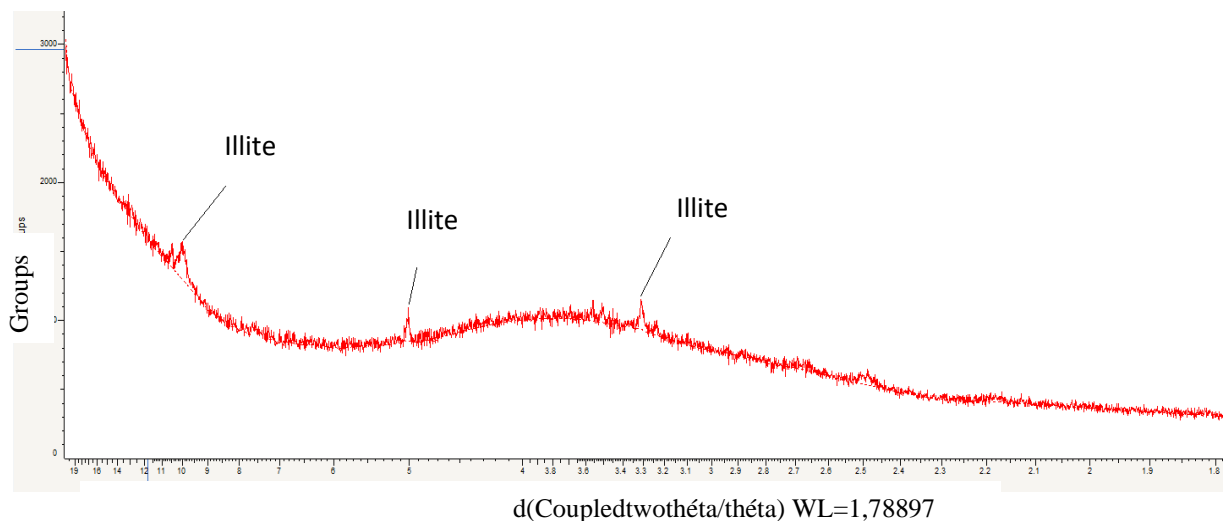


Figure 35 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Songon chauffée.

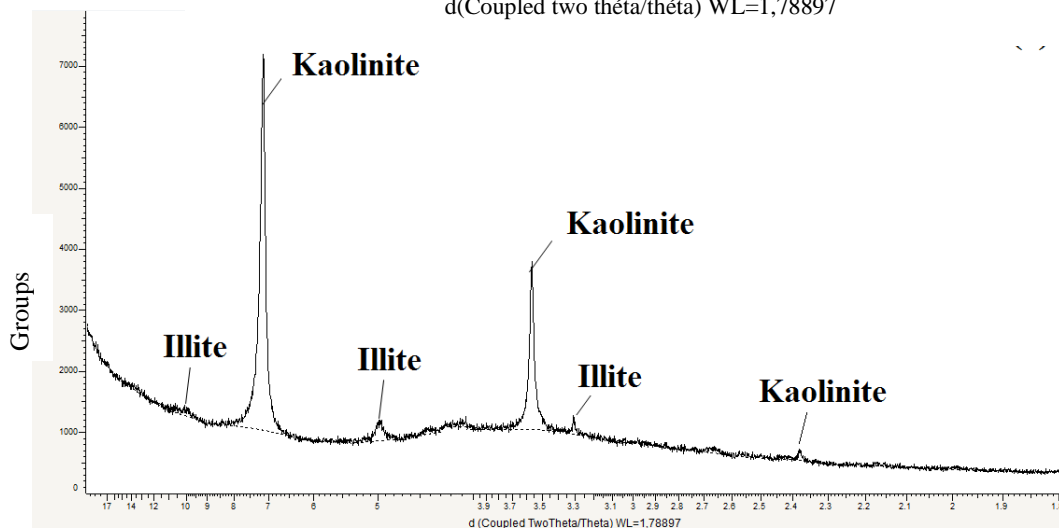
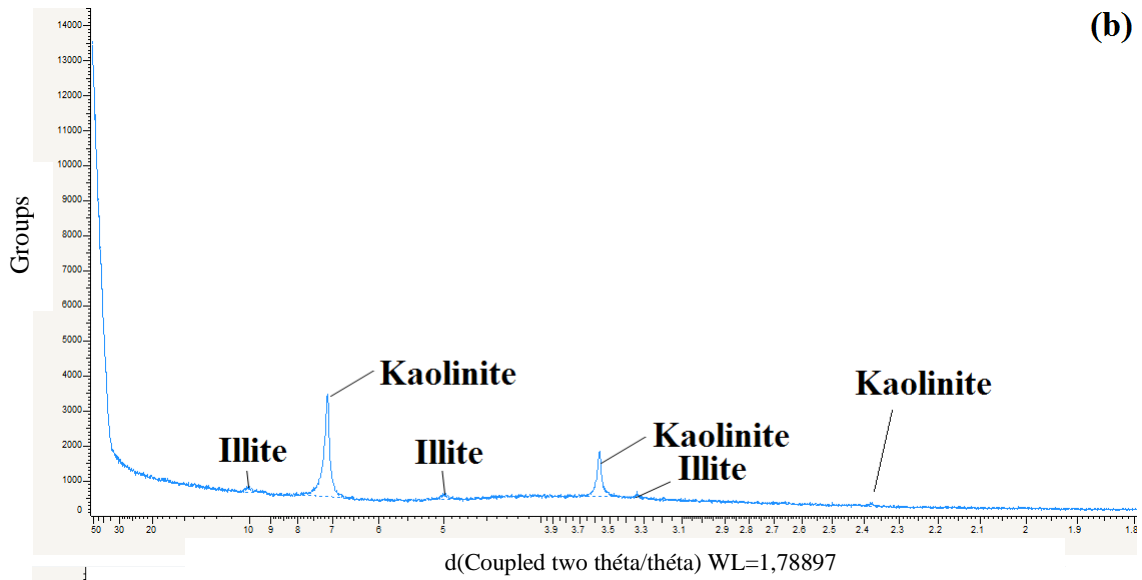
L'on note, après analyse, la présence de la kaolinite dans les sables argileux de Songon, décelée par des pics à 7,1 Å (001) ; 3,55 Å (002) et 2,36 Å (003) sur les diffractogrammes de l'échantillon effectués sur lames normale et glycolée, ci-avant (Figure 34 b), et cette kaolinite est confirmée par leur disparition au chauffé. Les raies observées aux mêmes distances réticulaires respectives 10 Å (001) ; 5 Å (002) et à 3,3 Å (003) sur les diffractogrammes de l'échantillon en préparation orientée sur lames normales (Figure 34 a), glycolée et chauffée, ci-dessus (Figures 34 et 35).

V.3.3. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE SAMO

La minéralogie argileuse des sables de Samo est principalement composée de kaolinite et d'illite.

En effet, les raies observées à 7,1 Å (001) ; 3,55 Å (002) et 2,36 Å (003) sur les diffractogrammes de l'échantillon effectués sur lames normale et glycolée indiquent la présence de la kaolinite qui est confirmée par la disparition de ces pics dans les traitements au chauffage.

Les raies de l'illite ont été observées aux distances réticulaires respectives 10 Å (001) ; 5 Å (002) et 3,3 Å (003) sur les diffractogrammes de l'échantillon en préparation orientée sur lames normale, glycolée et chauffée (Figures 36 et 37). La kaolinite est dominante avec une proportion de 93,7% contre 6,3% d'illite (Figure 38)



d(Coupled two théta/théta) WL=1,78897

Figure 36 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo effectués sur lames normales (a) et glycolée (b).

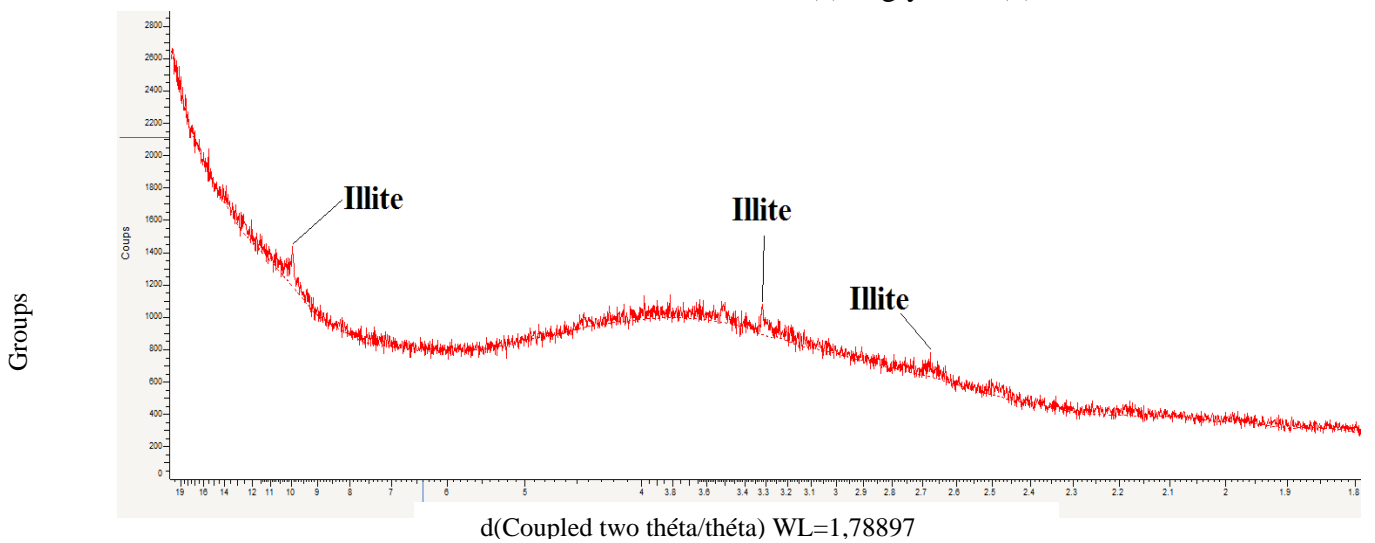


Figure 37 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo

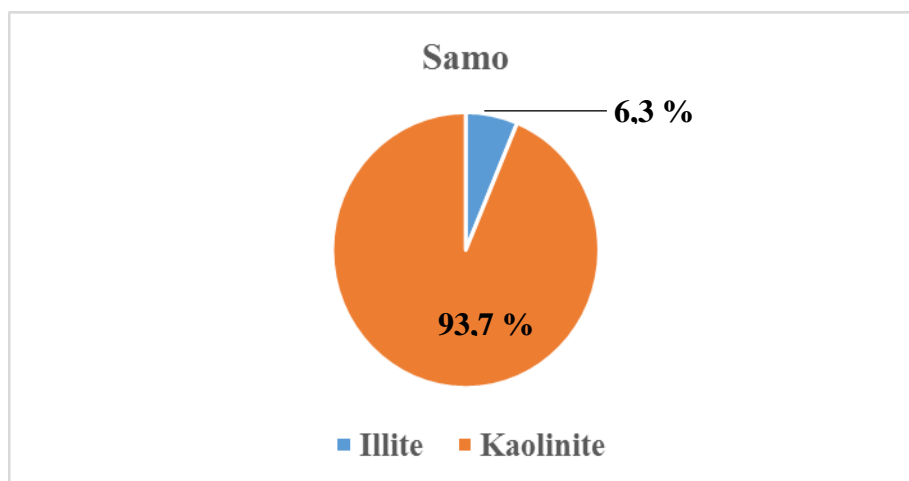


Figure 38 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Samo.

V.3.4. ANALYSE DES SABLES ARGILEUX DE GRAND-LAHOU

La composition minéralogique des argiles de Grand-Lahou est dominée par la kaolinite à 94,1% avec une faible présence de minéraux interstratifiés dont la chlorite/smectite (C/S) et la kaolinite/smectite (K/S) qui sont dans des proportions respectives de 3,5% et de 2,4%, ci-après (Figure 39).

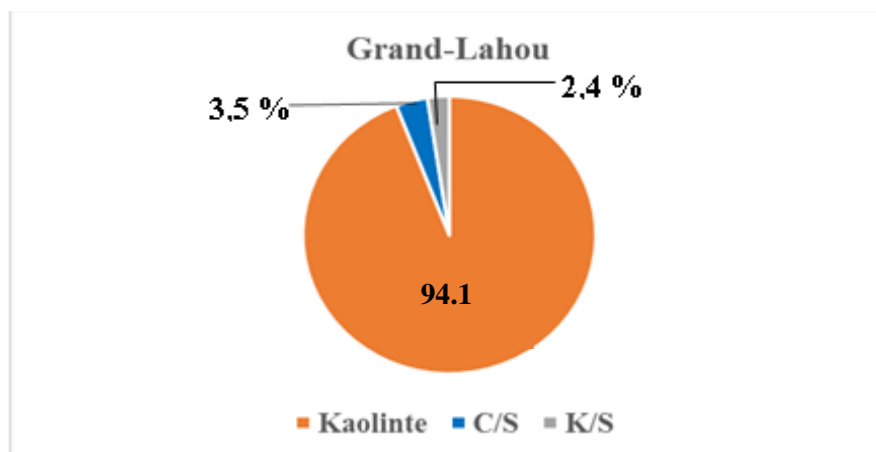
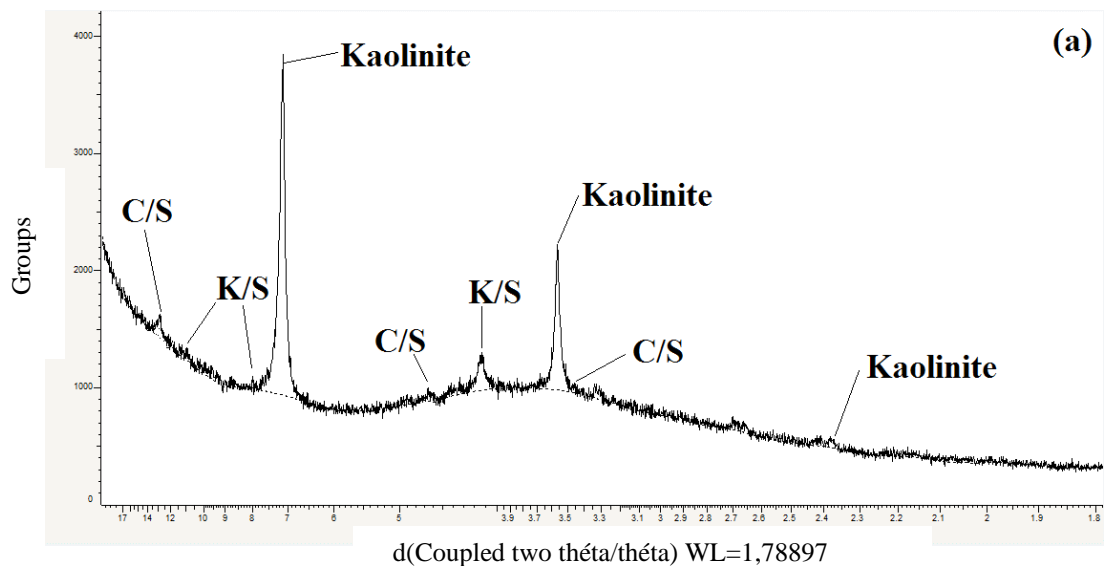
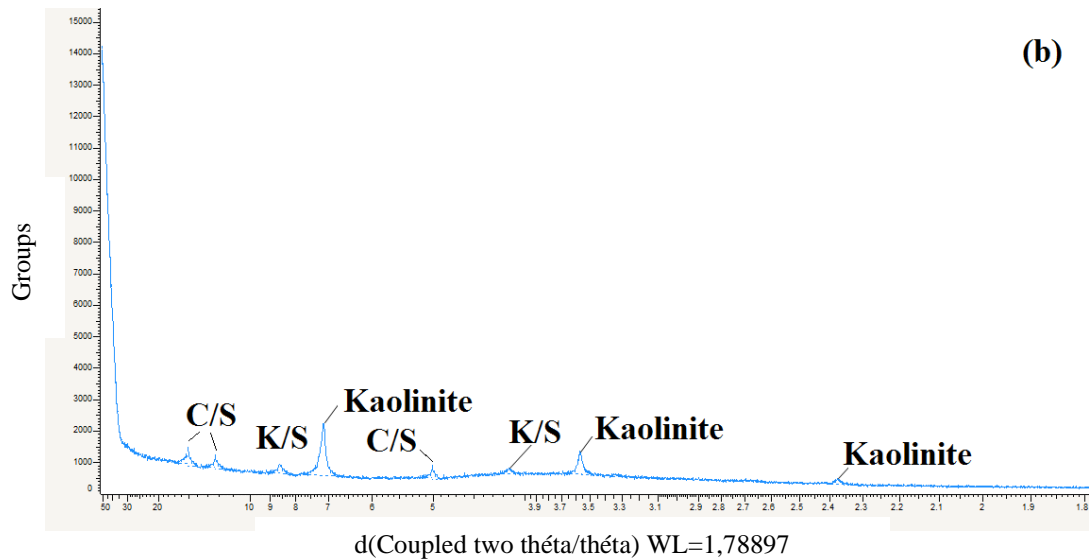


Figure 39 : Composition minéralogique de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou.

La kaolinite a été détectée à 7,1 Å (001) ; 3,55 Å (002) et 2,36 Å (003) dans les essais normaux et à l'éthylène-glycol et confirmée par l'absence d'effet de ces raies au chauffage, ci-après (Figures 40 et 41). La présence de la chlorite/smectite (C/S) a été décelée par les raies

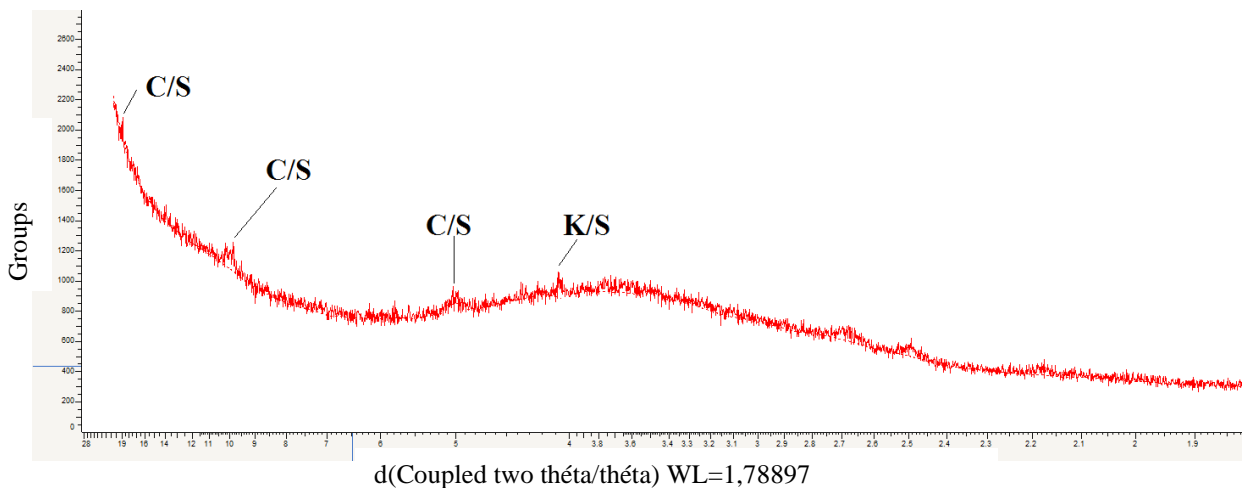
à 13,7 Å (002) ; 4,6 Å (003) et 3,4 (004) à l'essai normal, 15,5 Å (001) ; 12 Å (002) et 5,5 Å (003) à l'éthylène-glycol et 20 Å (001) ; 10 Å (002) et 5 Å (004) au chauffage.

La kaolinite/smectite (K/S) a été reconnue par les raies qui passent respectivement de 11,5 Å (002) ; 8 Å (003) et 4,1 Å (004) au traitement normal à 12 Å (002) ; 8,7 Å (003) et 4,1 Å (004) à l'éthylène-glycol et confirmée par l'absence d'effet des raies au chauffage, ci-après (Figure 40 et 41) sauf à 4,1 Å (004).



C/S = Chlorite/ Smectite. K/S = Kaolinite/Smectite

Figure 40 : Diffractogrammes de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou effectués sur lames normales (a) et glycolée (b).



C/S = Chlorite/ Smectite. K/S = Kaolinite/Smectite

Figure 41 : Diffractogramme de la fraction fine de l'échantillon des sables argileux de Grand-Lahou chauffée.

V.4. DISCUSSION

En observant les résultats géotechniques des sables argileux tropicaux d'Afrique de l'ouest en construction routière, l'on peut dire que les échantillons étudiés ne sont pas convenables pour la confection d'une couche d'assise en référence aux travaux de MILLOGO (2008).

Ces résultats se justifient par les teneurs en fines qui restent supérieures à 35 % et par le fait que le produit de l'indice de plasticité par le pourcentage de fines est, aussi, supérieur à la valeur maximale 100 admise pour une matière première de couche de base (MILLOGO, 2008). Les normes géotechniques pour les matériaux de couches d'assise en technique routière tiennent compte de l'intensité du trafic et de l'épaisseur des couches de chaussée. Le trafic moyen est à prendre en compte pour la durabilité des routes. Les valeurs minimales du CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau admises pour les matières premières de couche de fondation et de base pour le trafic de type T1 à T3 sont respectivement de 30 % et 80 % (MILLOGO, 2008). Tenant compte de ces paramètres géotechniques, les échantillons étudiés ne sont toujours pas convenables pour la confection d'une couche d'assise de chaussée.

Les propriétés géotechniques des échantillons des pays d'Afrique du nord sont globalement meilleures que celles rapportées sur les sols du sud de la Côte d'Ivoire. Ces sols contiennent une forte proportion en fraction fine constituée essentiellement de minéraux argileux comparativement aux échantillons étudiés et de ceux du Burkina (MILLOGO, 2008). Il est

bien connu qu'une forte proportion en argile, a un effet néfaste sur les propriétés géotechniques d'un sol. Les différences observées seraient liées à la genèse des sols et aussi au climat sous lequel ils ont été formés. En effet, les sols du sud de la Côte d'Ivoire sont formés sous un climat humide avec une pluviométrie annuelle appréciable tandis que ceux du Burkina Faso sont formés sous un climat sec avec une faible pluviométrie annuelle. Les sols du sud de la Côte d'Ivoire proviennent de l'altération du granite et de la phyllite tandis que les sols du sud du Burkina Faso se sont développés par altération du grès et du granite (OSULA, 1996 ; ASSALE, 2013). Ces sols sont enrichis en quartz. La forte teneur en quartz contribue à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques et à la stabilité des chaussées. L'on note aussi, que la localisation géographique des échantillons, tous, prélevés dans la partie nord du trou sans fond que représente la faille des lagunes du sud de la Côte d'Ivoire pourrait avoir des facteurs probants qui favoriseraient l'amélioration des dites propriétés, dont, notamment la granulométrie. Les sols du sud de la Côte d'Ivoire ont des propriétés géotechniques et mécaniques semblables car ils sont tous des sols de zones de forêt. Contrairement aux sols du Burkina Faso et du Sénégal qui sont des sols de zones de savane, ils ont des propriétés géotechniques et mécaniques similaires car ils sont constitués d'éléments grossiers convenables. Les travaux d'ASSALE et *al.* (2012) ont montré que les sables argileux de Bingerville sont enrichis en quartz et ont signifié la présence de certains minéraux tels que la goethite, la limonite, l'hématite qui influencent la coloration des sols tout comme la variation du degré d'oxydation. Ces résultats seraient en phase avec ceux de nos travaux.

En ce qui concerne la minéralogie, il faut remarquer que, de par leurs caractérisations physiques, chimiques et minéralogiques, ces sables argileux présentent des aptitudes pour leur utilisation en technique routière. Ils ont une teneur importante en oxyde d'aluminium Al_2O_3 et ne contiennent pas assez de minéraux argileux gonflants de type smectites comme la montmorillonite ; de même la présence très faible du Carbone Organique Total (COT), ce qui laisse supposer qu'ils peuvent être traités à l'aide de mélange liants hydrauliques comme le ciment Portland (MOLARD et *al.*, 1987 ; TEMIMI et *al.*, 1998). En effet, LEROUX et *al.* (1969) établissant un ordre de grandeur des résistances mécaniques des argiles traitées au ciment et à la chaux, ont montré que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec la kaolinite et sont suivies de l'illite. Quant aux smectites, elles se prêtent moins à ce type de traitement car elles consomment la totalité des ions Ca^{2+} libérés par le ciment lors de son hydratation et empêchant ainsi sa prise ; cependant AMOR (1995) rapporte que la kaolinite ne fixe que les deux tiers de ces ions.

CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre V, l'on note que le diamètre maximum des particules de tous les sables argileux est inférieur à 50 mm, ce sont des sols qui appartiennent à la classe A selon la classification du Guide des Terrassements Routiers (GTR). Le GTR (2014) indique que les sols de Bingerville, Grand-Lahou, Songon et Samo appartiennent à la sous-classe A2, de nature argileuse plastique avec les Indices de Plasticité demeurant entre 12% et 25%. Par contre les Sols de Samo ayant un pourcentage en fine inférieur à 35%, ces sols sont de la sous-classe B6. Pour ces différents sols du sud de la Côte d'Ivoire provenant, tous, du nord de la faille des lagunes l'on envisagerait un gradient d'Est en Ouest et/ou d'Ouest en Est depuis la zone de Sassandra jusqu'à la limite du Ghana où se localiseraient les limons sablo argileux avec trace de grave, les limons argilo sableux avec trace de grave et les sables argileux. Ces sols sont enrichis en silice plus qu'en fer et sont de nature non latéritique.

Selon la classification du LBTP (1997), les sols de Bingerville, Grand-Lahou, Songon et Samo ne peuvent, donc, être utilisés à l'état naturel ni comme couche de fondation ni comme couche de base de route compte tenu de leur état de plasticité ($IP > 12\%$), de leurs densités sèches inférieures à 2 et de leur CBR n'excédant pas 30 à 95% de l'optimum Proctor modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau. Les résultats des essais de portance, les quatre (4) sols étudiés, ici, ne peuvent être utilisés à l'état naturel comme assise de route mais plutôt pour des couches de plate-forme pour des routes de trafic relativement faible de type T₁.

Par ailleurs, les coefficients de gonflement volumiques inférieurs à 5 traduisent l'aptitude des sables argileux à être traité aux mélanges liants hydrauliques. Cependant, l'utilisation judicieuse d'un matériau exige la maîtrise de ses propriétés physiques, chimiques et minéralogiques. Les valeurs extrêmement faibles du Carbone Organique Total (COT) dans la matière première argileuse à l'état naturel varient entre 0,10 et 0,15% inférieures à 1. Dans de telles conditions, les sables argileux montreraient une aptitude à supporter un trafic routier et pourraient être traités aux mélanges liants hydrauliques.

L'analyse au diffractomètre a permis de connaître la nature ou le type d'argile constituant cette matière première. En outre, L'Indice de Plasticité (IP) dans ces sols naturels, élevé, supérieur à 12%, selon cette recommandation, les sables argileux peuvent être sujets au traitement mixte de mélange (chaux et ciment).

CHAPITRE VI. TRAITEMENT DES SABLES ARGILEUX AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT

La matière première, sable argileux, des différents sites d'étude sera associée à des proportions variables de liants hydrauliques (chaux et ciment).

Il s'agit d'identifier l'influence des traitements des mélanges chaux et ciment sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sables argileux en vue de leur utilisation en techniques routières.

Les essais qui ont permis d'étudier cette influence sont : l'essai Proctor modifié, l'essai CBR à 95% à l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau, les essais de compression et de traction à 28 ; 90 et 360 jours de cure.

VI.1. INFLUENCE DES TRAITEMENTS AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT SUR L'ESSAI PROCTOR MODIFIE DES DIFFERENTS SABLES ARGILEUX

Les différents mélanges (Pourcentage de sable argileux additionné aux pourcentages de chaux et ciment) sont soumis à l'essai Proctor modifié et les différentes courbes Proctor modifié de ces mélanges sont présentées, ci-après (Figure 42 ; Figure 43 ; Figure 44 et Figure 45).

A partir de ces courbes, il a été déterminé, d'abord, la teneur en eau optimale et la densité sèche correspondante pour chaque traitement aux mélanges chaux et ciment des sables argileux. Ces résultats de Proctor modifié obtenus permettront, ensuite, de procéder à l'essai CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau sur ces mêmes sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment à partir des teneurs en eau optimale de chaque sol.

L'on peut dire que l'amélioration du sable argileux de Grand-Lahou avec un mélange chaux et ciment permet d'obtenir des densités sèches allant de 1,72 à 1,88, ci-après (Figure 42). La teneur en eau optimale varie de 17,2 à 19%.

De cette figure, il se dégage trois (3) gammes qui correspondent chacune à trois indices de traitement aux mélanges chaux et ciment.

La densité sèche la plus élevée pour la gamme (G1), concernant le sol de Grand-Lahou est obtenue à partir du mélange de 1% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 3 ; il s'agit de 1,86.

Pour la gamme (G2), la densité sèche est obtenue à partir du mélange de 2% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 6 ; il s'agit de 1,88.

La densité sèche pour la gamme (G3) est obtenue à partir du mélange de 3% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 9 ; il s'agit de 1,75.

Les densités sèches élevées correspondent à des pourcentages de teneur en eau minimale des différents sables argileux qui sont représentées sur les figures (42 à 45) ci-après :

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou

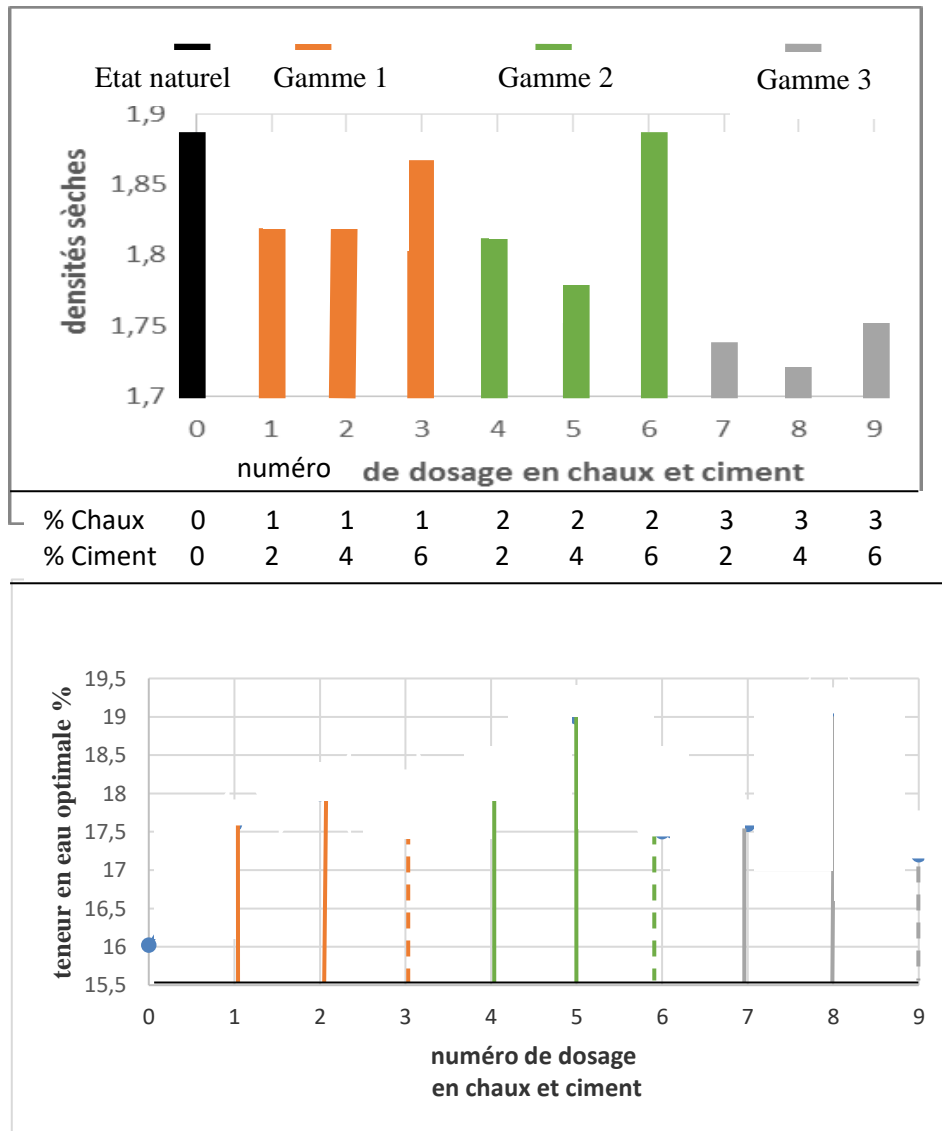


Figure 42 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Grand-Lahou.

Les sables argileux de Songon donnent des densités sèches comprises entre 1,77 et 1,89, ci-après (Figure 43) avec la teneur en eau optimale variant de 12,32 à 17,77%.

La densité sèche la plus élevée pour la gamme (G1), concernant le sol de Songon est obtenue à partir du mélange de 1% de chaux et de 2% de ciment, soit le numéro de dosage 1 ; il s'agit de 1,88.

Pour la gamme (G2), la densité sèche est obtenue à partir du mélange de 2 % de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 6 ; cette valeur est 1,90.

La densité sèche pour la gamme (G3) est obtenue à partir du mélange de 3% chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 9 ; cette valeur est 1,85.

Les densités sèches élevées correspondent à des pourcentages de teneurs en eau minimale du sol de Songon.

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon

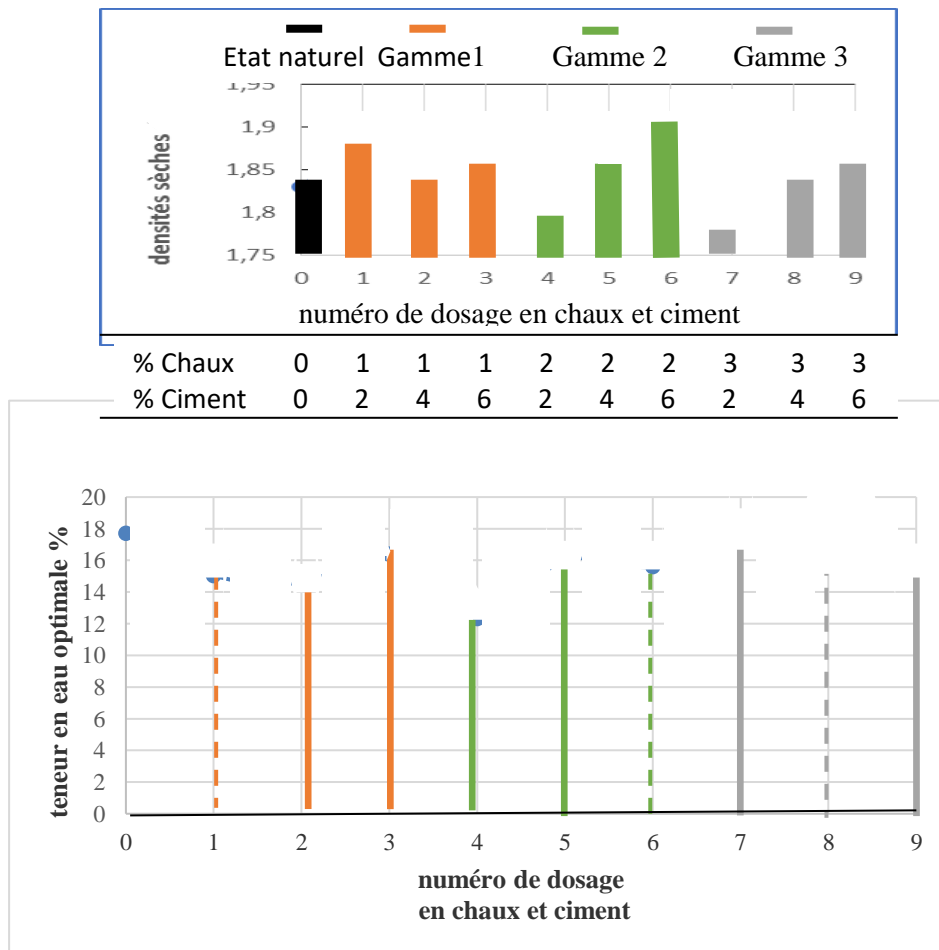


Figure 43 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Songon.

Les sables argileux de Samo donnent des densités sèches comprises entre 1,78 et 1,94 et des teneurs en eau optimales allant de 12,20 à 17,80%.

La densité sèche la plus élevée pour la gamme (G1), concernant le sol de Samo est obtenue à partir du mélange de 1% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 3 ; cette valeur est de 1,94. Pour la gamme (G2), la densité sèche est obtenue à partir du mélange 2 % de chaux et de 4% de ciment, soit le numéro de dosage 5 ; cette valeur est 1,85. La densité sèche pour la gamme (G3) est obtenue à partir du mélange de 3% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 9 ; cette valeur est 1,86, ci-dessous (Figure 44).

Les densités sèches élevées de la gamme (G1, G2, et G3) sont 1,94 ; 1,85 et 1,86. Elles correspondent à des pourcentages de teneurs en eau maximale, respectivement 16,2% et 16%

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo

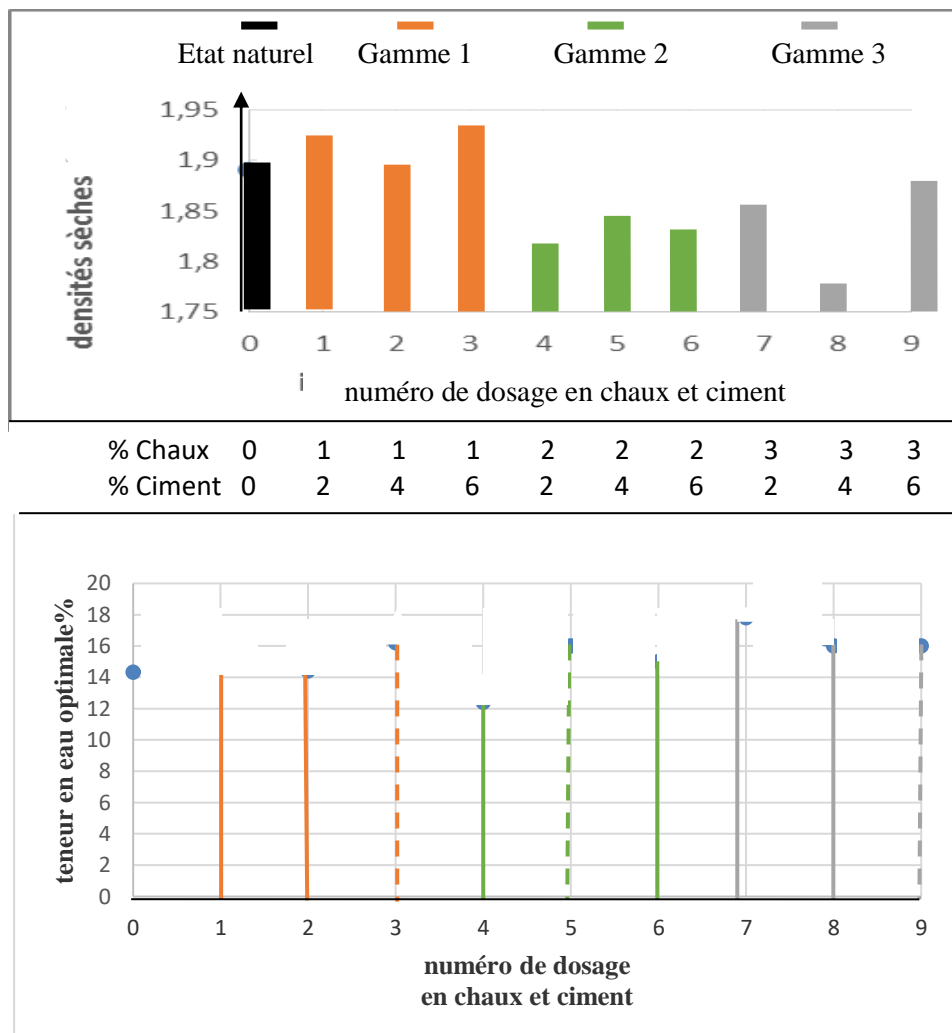


Figure 44 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Samo.

L'amélioration du sable argileux de Bingerville avec un mélange composé de chaux et de ciment permet d'obtenir des densités sèches allant de 1,83 à 2,03, ci-après (Figure 45). La teneur en eau optimale varie de 14,36 à 17,5%. Il se dégage trois (3) gammes correspondantes, chacune à trois indices de traitement aux mélanges chaux et ciment. La densité sèche la plus élevée pour la gamme (G1), concernant le sol de Bingerville est obtenue à partir du mélange de 1% de chaux et de 2% de ciment, soit le numéro de dosage 1 ; il s'agit de 2,03 ; elle correspond à la teneur en eau optimale de 15,20%. Pour la gamme (G2), la densité sèche est obtenue à partir du mélange de 2 % de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 6 ; il s'agit de 1,92 ; elle correspond à la teneur en eau optimale minimale de 14,36%. La densité sèche pour la gamme (G3) est obtenue à partir du mélange de 3% de chaux et de 6% de ciment, soit le numéro de dosage 9 ; il s'agit de 1,95 ; elle correspond à la teneur en eau optimale de 16%.

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville

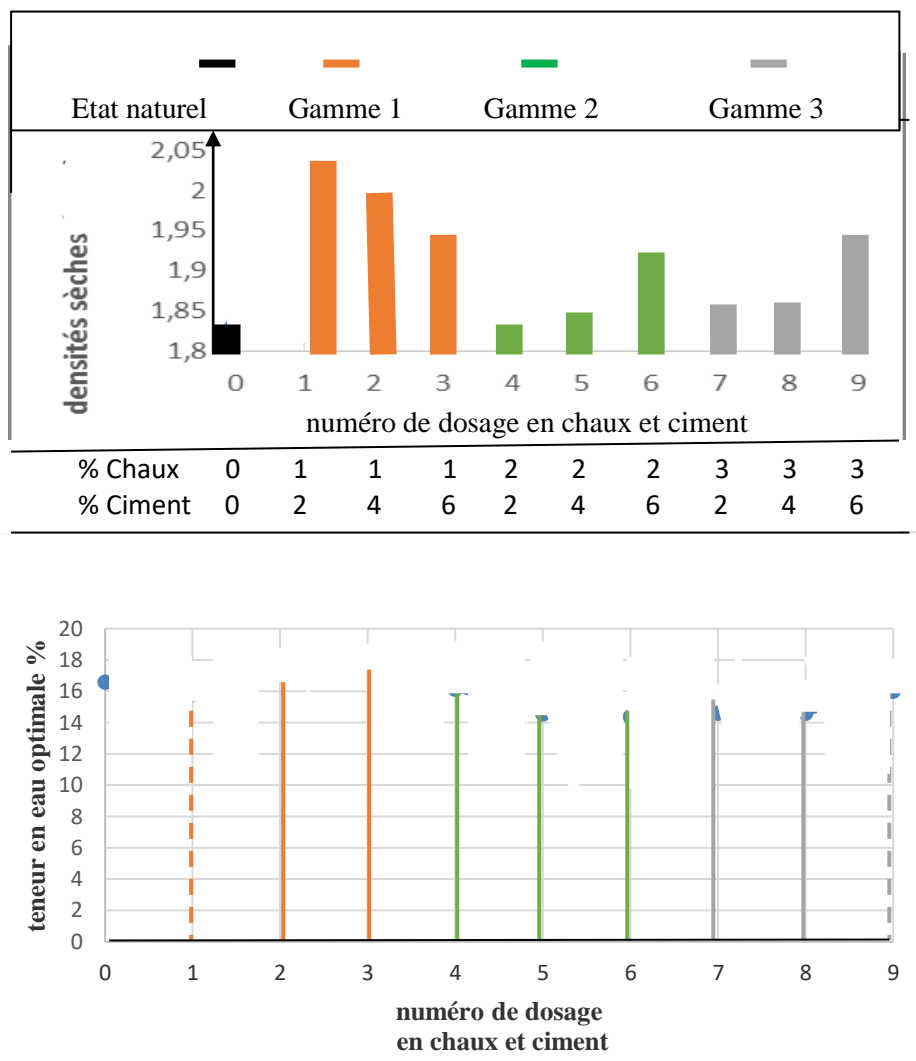


Figure 45 : Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau optimale en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des sables argileux de Bingerville

De façon générale, les Teneurs en Eau Optimale (TEO) augmentent tandis que les densités sèches maximales diminuent avec l'ajout du mélange chaux et ciment aux sables argileux. L'augmentation de la TEO est due à la forte affinité de la chaux et du ciment vis-à-vis de l'eau.

L'augmentation de la quantité de chaux et du ciment requiert assez d'eau pour dissocier la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et pour produire des cations Ca^{2+} nécessaires aux réactions d'échange cationique. La réduction de la Densité Sèche Maximale (DSM) est due au fait que l'ajout du mélange chaux et ciment aux sables argileux, crée une ségrégation des particules du sol et de ce fait génère un plus grand volume. Cela entraîne une modification de la distribution de la taille des particules dans le sol.

L'analyse de ces figures montre que les différents sables argileux, matière première, de cette étude, atteignent une densité sèche maximale pour certains et minimale pour d'autres, lorsqu'ils sont améliorés avec des proportions variables du mélange chaux et ciment.

Les traitements des sols retenus après la mise en œuvre des mélanges chaux et ciment, en poids volumique, dans les essais de Proctor modifié sont comme ci-dessous :

SABLES ARGILEUX DE GRAND-LAHOUE :

- GL3 = Mélange de 1% chaux + 6% ciment + 93% sable argileux de Grand-Lahou,
- GL6 = Mélange de 2% chaux + 6% ciment + 92% sable argileux de Grand-Lahou,
- GL9 = Mélange de 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux de Grand-Lahou.

SABLES ARGILEUX DE SONGON :

- SG1 = Mélange de 1% chaux + 2% ciment + 97% sable argileux de Songon,
- SG6 = Mélange de 2% chaux + 6% ciment + 92% sable argileux de Songon,
- SG9 = Mélange de 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux de Songon.

SABLES ARGILEUX DE SAMO :

- S3 = Mélange de 1% chaux + 6% ciment + 93% sable argileux de Samo,
- S5 = Mélange de 2% chaux + 4% ciment + 94% sable argileux de Samo,
- S9 = Mélange de 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux de Samo.

SABLES ARGILEUX DE BINGERVILLE :

- B1 = Mélange de 1% chaux + 2% ciment + 97% sable argileux de Bingerville,
- B6 = Mélange de 2% chaux + 6% ciment + 92% sable argileux de Bingerville,
- B9 = Mélange de 3% chaux + 9% ciment + 91% sable argileux de Bingerville.

Les sables argileux de Grand-Lahou ont des densités sèches allant de 1,88 à 1,72. Celles de Samo ont des densités sèches de 1,78 à 1,94. Quant à ceux de Songon, les densités sèches sont comprises entre 1,74 et 1,90 lorsqu'ils sont traités aux mélanges chaux et ciment. Enfin, les densités sèches des sables argileux de Bingerville sont comprises entre 1,83 et 2,03.

De tous ces sables argileux, celui de Grand-Lahou donne des densités sèches faibles après traitement aux mélanges chaux et ciment. La valeur la plus faible des densités sèches est 1,72. Les densités sèches connaissent globalement une hausse après traitement, hormis les sables argileux de Grand-Lahou qui ont des densités sèches faibles qui diminuent après traitement aux mélanges chaux et ciment.

L'on note que le sol de Grand-Lahou présente un comportement particulier, c'est-à-dire, qu'au fur et à mesure que le dosage en chaux et ciment augmente ainsi que la teneur en eau ; la densité sèche diminue progressivement de 1,88 à 1,72.

Au niveau des sols de Samo, Bingerville et Songon, l'on peut remarquer que pour des teneurs en eau faibles on a des densités sèches qui augmentent par rapport à l'échantillon naturel. Puis, pour des teneurs en eau élevées les densités sèches sont faibles. On note aussi que la densité sèche est élevée pour des traitements aux mélanges chaux et ciment avec une teneur en eau élevée dans la gamme. Il s'agit des sols : Bingerville dans la gamme 3, Samo dans la gamme 1 et 2.

L'on observe que lorsque la teneur en eau, dans ces sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment augmente, la densité sèche diminue.

Cette différence de densité sèche, des sables argileux de Grand-Lahou, d'avec celles des densités sèches des sables argileux des autres localités, s'expliquerait par sa granulométrie. C'est-à-dire, le fait que les sables argileux de Grand-Lahou possèdent la proportion la plus élevée d'argile (30%) par rapport aux autres sables argileux des autres localités : Songon 24%, Samo 20% et Bingerville 24%.

Cette forte proportion d'argile montrerait, ainsi, sa plus forte susceptibilité à retenir plus d'eau que les autres sables argileux.

Les sables argileux de Bingerville, Samo et de Grand-Lahou possèdent des densités sèches relativement faibles en fonction du type d'argile présent dans les différents sols.

En effet, les sables argileux qui regorgent une grande quantité d'argile de type kaolinite ont un comportement particulier par rapport à un sable argileux qui contient des argiles de type montmorillonite.

VI.2. INFLUENCE DU TRAITEMENT DU MELANGE CHAUX ET CIMENT SUR LE CBR OU L'INDICE PORTANT IMMEDIAT (IPI) DES SABLES ARGILEUX ETUDIES

L'Indice Portant Immédiat (IPI) varie en fonction de la densité sèche du sol, ainsi que du mélange chaux et ciment, ci-après (Figure 46).

A 95% de l'OPM, immédiatement, l'on remarque que pour des IPI compris entre 50 et 70, l'on a, d'abord, des densités sèches qui varient de 1,86 à 2 pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo puis pour des IPI entre 70 et 78 l'on a des densités sèches qui varient de 1,91 à 2,02 cela concerne les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou.

Ensuite, les sables argileux de Bingerville, traités aux mélanges chaux et ciment, quant à eux présentent des IPI allant de 55 à 65 pour des densités sèches qui varient de 2 à 2,05.

Enfin, l'on constate que les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon présentent des IPI entre 48 à 68 pour des densités sèches de 1,95 à 2,05.

Les sables argileux de Grand-Lahou présentent les valeurs de IPI les plus élevées allant de 70 à 78, suivies des valeurs de IPI des sables argileux de Songon qui vont de 48 à 68, ensuite, ceux des sables argileux de Bingerville avec des IPI de 55 à 65 et enfin les sables argileux de Samo qui ont des IPI de 50 à 70.

On remarque que les IPI à 95% de l'OPM des différents sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment sont largement supérieurs à 35. De par leurs valeurs respectives d'IPI les plus élevées, ces sols peuvent assurer une circulation immédiate des engins pendant la réalisation du chantier selon les recommandations du LBTP (1980).

Les différents traitements de mélange chaux et ciment sur les sables argileux étudiés qui ont des indices portant immédiats à 95% de l'OPM les plus élevés sont SG1 (66), GL3 (76), S5 (60) et B9 (64).

Ces Indices Portants Immédiats (IPI) à 95% de l'OPM pourraient rentrer dans le cadre de l'utilisation des sols dans la couche de fondation et dans la couche de base des routes de trafic faible T1 et T2.

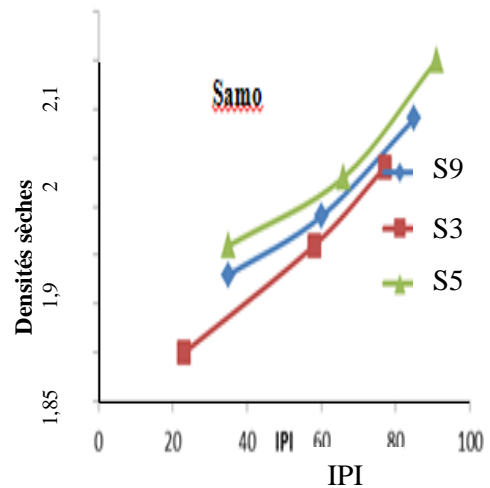
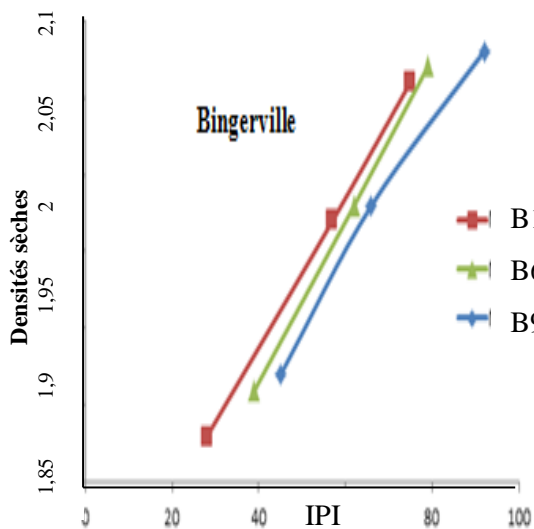
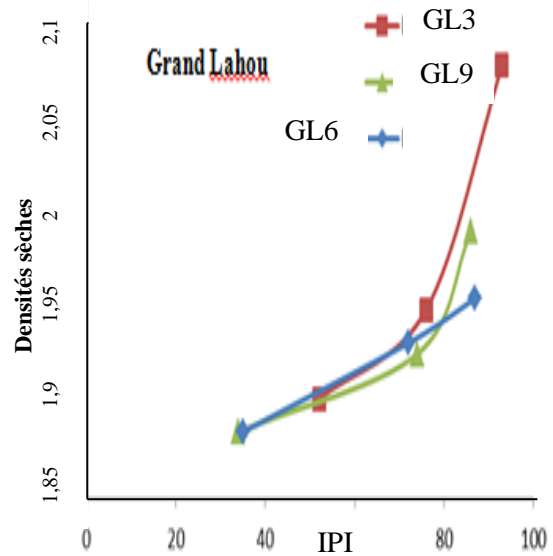
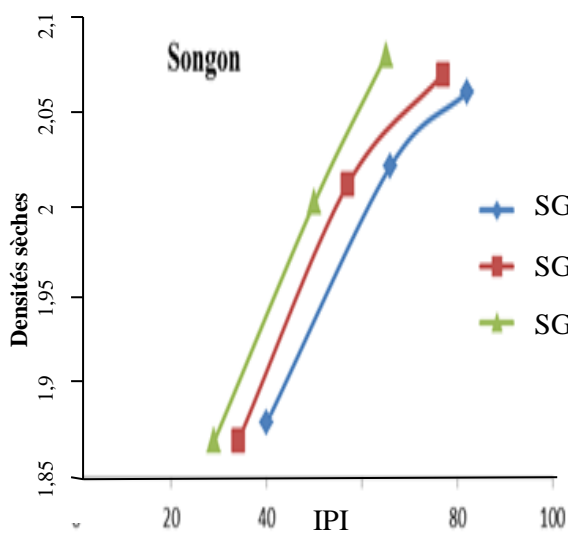


Figure 46 : Indice Portant (ou CBR) Immédiat à 95% de l'OPM des sols étudiés après traitement aux mélanges chaux et ciment.

VI.3. INFLUENCE DU TRAITEMENT AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT SUR L'INDICE PORTANT OU CBR A 95% A 4 JOURS D'IMMERSION DANS L'EAU DES SABLES ARGILEUX

Les figures 47 à 50, ci-après, montrent l'évolution de l'indice CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment ; qui sont aussi fonction de la teneur en eau (w) et de la densité sèche (γ_d). Les résultats des indices portants après immersion varient selon le sol.

Il s'agit de la mise en évidence des valeurs de CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau. Le CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau varie en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment, ci-dessous (Figure 47).

L'analyse de cette figure 47 permet de montrer que la courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau croît pour atteindre un pic à 80. Ensuite, cette courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau décroît jusqu'à atteindre une valeur de 41.

En effet, pour un numéro 3 de dosage chaux et ciment, 3 correspond à un mélange de 1% de chaux et 6% de ciment, l'on a un CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau de 65.

Pour un numéro 6 de dosage chaux et ciment, 6 correspond à un mélange de 2% de chaux et 6% de ciment, l'on a un CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau de 79.

Le CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau est de 41 pour un numéro 9 de dosage chaux et ciment, 9 correspond à un mélange de 3% de chaux et 6% de ciment.

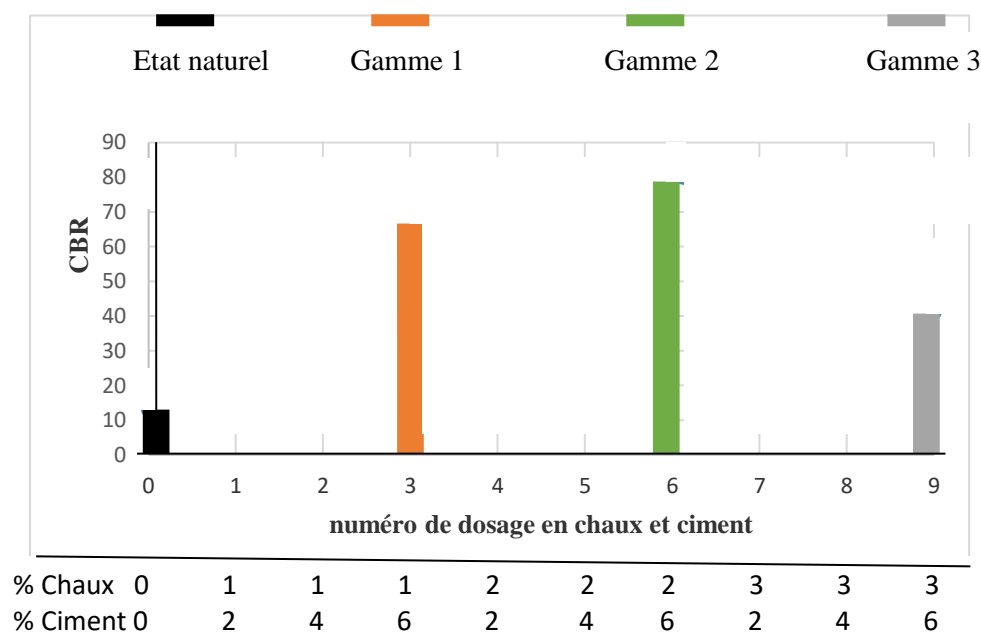


Figure 47 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Grand-Lahou

L'analyse de la figure 48, ci-dessous, permet de montrer que pour un numéro 1 de dosage de chaux et ciment, 1 correspond à un mélange de 1% de chaux et 2% de ciment, l'on a un CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau de 94.

Pour un numéro 6 de dosage de chaux et ciment, 6 correspond à un traitement au mélange chaux et ciment de 2% de chaux et 6% de ciment, l'on a un CBR de 61.

Le CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau est de 41% pour un numéro 9 de dosage chaux et ciment, 9 correspond à un mélange de 3% de chaux et 6% de ciment.

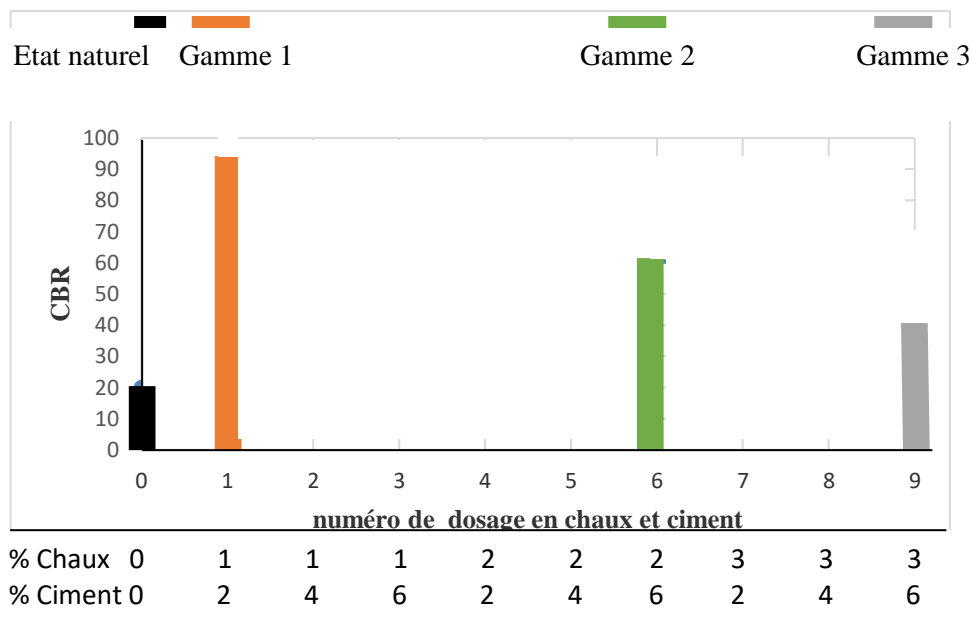


Figure 48 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Songon.

L'analyse de cette figure 49, ci-après, montre que l'évolution de la courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau croît jusqu'à atteindre un pic à 117 correspondant à un ajout de 2% de chaux et 4% de ciment. Ensuite, cette courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau décroît lentement jusqu'à atteindre une valeur de 87, correspondant à un ajout du mélange de 3% de chaux et de 6% de ciment.

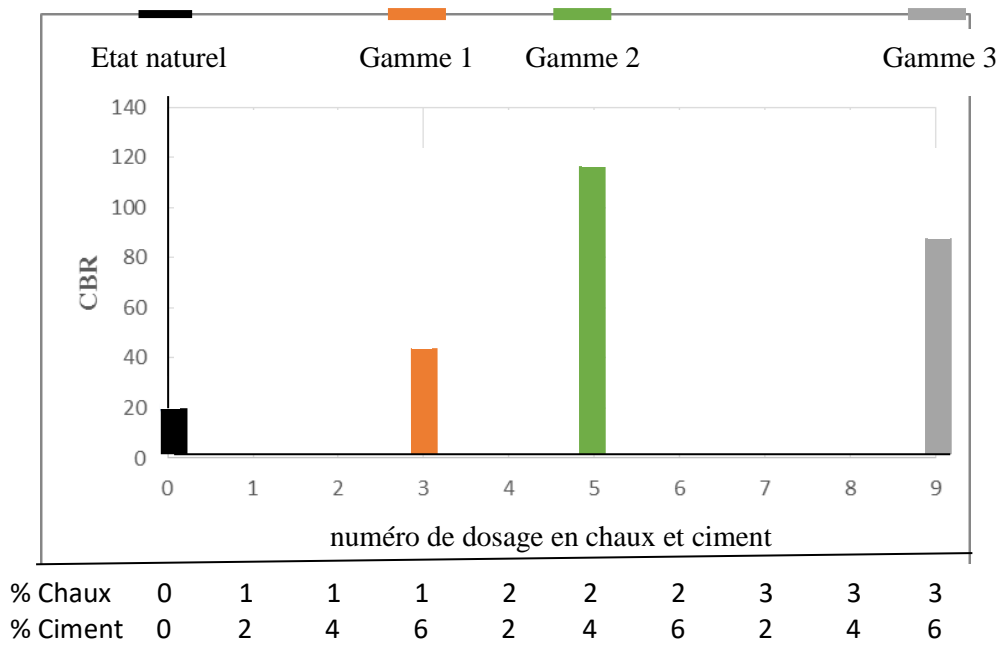


Figure 49 : CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Samo.

La figure 50, ci-après, permet d'observer que l'évolution de la courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau est croissante dans l'ensemble face aux différents dosages en chaux et ciment.

En effet, au fur et à mesure qu'on augmente le taux de chaux, la courbe CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'immersion dans l'eau augmente pour atteindre un pic à 94. Ce pic correspond à un ajout de 3% de chaux et de 6% de ciment.

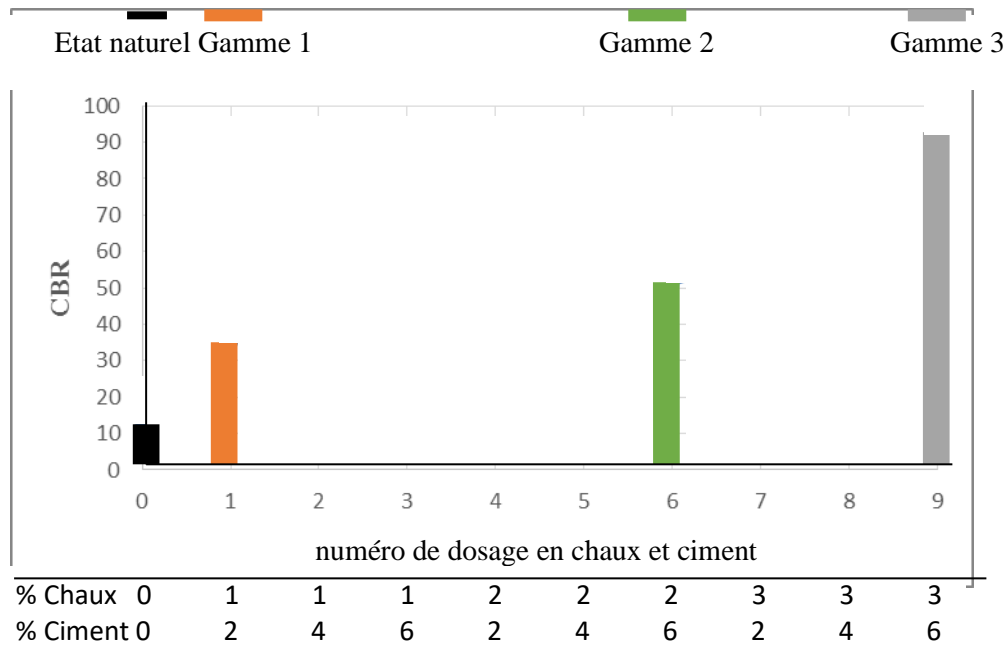


Figure 50 : CBR à 95% de l’OPM à 4 jours d’immersion dans l’eau des sables argileux de Bingerville.

Les courbes d’évolution de l’indice CBR à 95% de l’OPM après 4 jours d’immersion dans l’eau, pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment avec des pourcentages variables de chaux et de ciment (numéro de dosage en chaux et ciment), montrent l’augmentation très rapide de cet indice portant en fonction du traitement.

L’amélioration de la portance des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment (augmentation de CBR à 95% de l’OPM à 4 jours d’immersion dans l’eau) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de chaux et de ciment.

Les différents traitements aux mélanges chaux et ciment des sables argileux présentant des indices CBR 95% de l’OPM à 4 jours d’immersion les plus élevées sont : SG1 (94), GL6 (79), S5 (117) et B9 (94).

Ces indices CBR à 95% de l’OPM à 4 jours d’immersion dans l’eau, pourraient être utilisés en couche d’assise de chaussée pour des trafics faibles de classe T1 et T2.

VI.4. DISCUSSION SUR L'INFLUENCE DU MELANGE DE CHAUX ET CIMENT SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES SABLES ARGILEUX

Le traitement des sables argileux avec le mélange de liants hydrauliques (chaux et ciment) a permis une nette amélioration des propriétés mécaniques des sols de Grand-Lahou, Samo, Bingerville et Songon.

MILLOGO (2008), MARTIAS (2011) et SOULEY (2016) rapportent que la chaux et le ciment étant des liants hydrauliques, ils contribuent à l'augmentation des propriétés mécaniques des sols. Pour la chaux, c'est l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , qui est un produit de l'hydratation de la chaux vive qui réagit avec les minéraux argileux et la silice fine Si ; ceci, est à la base du changement des propriétés mécaniques des matériaux (sol argileux plus ciment plus chaux). Le ciment participe à l'amélioration des dites propriétés par un mécanisme d'union des particules des sables argileux par les Silicates de Calcium Hydratés (CSH) produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuses de l'ensemble. L'action des liants dépend de la répartition des grains, des diamètres et de la minéralogie de la matière première traitée (sable argileux).

Pour l'essai Proctor modifié, il faut noter que, dans un premier temps, les sables argileux de Samo, Bingerville et Songon présentent des teneurs en eau optimale (W_{OPM}) faibles correspondant à des densités sèches (γ_d) élevées. Dans un second temps, pour des teneurs en eau élevées, l'on a des densités sèches (γ_d) qui diminuent.

Cependant, les sables argileux de Grand-Lahou présentent un cas différent, c'est-à-dire qu'au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, la densité sèche diminue progressivement de 1,84 à 1,72.

Cette deuxième approche est vérifiée par KHATTAB (2002) et MILLOGO (2008). Pour ces auteurs, l'ajout de la chaux et du ciment à un sol argileux fait augmenter la teneur en eau optimale (W_{OPM}) et par conséquent la densité sèche maximale (γ_d) diminue. L'accroissement de la teneur en eau optimale est due à la forte demande en eau après l'ajout des liants en vue de dissocier le Ca(OH)_2 pour produire des ions Ca^{2+} nécessaires pour les réactions d'échange cationique et pouzzolanique. La diminution de la densité sèche maximale d'un sol par l'ajout de la chaux s'expliquerait de deux manières :

- 1) l'ajout de la chaux à un sable argileux provoque l'agglomération des particules de ce sol et ces particules occupent alors de grands volumes ;

2) la densité absolue de la chaux est généralement en dessous des densités absolues des sables argileux des différents sites de l'étude.

La différence observée entre les sables argileux de Grand-Lahou d'avec ceux des sables argileux des autres localités s'expliquerait par la présence, dans ces sables argileux, des interstratifiés kaolinite/smectites (K/S) et chlorite/smectites (C/S) des argiles qui sont des argiles gonflantes susceptibles d'influencer l'effet pouzzolanique des traitements à l'instar de la smectite et la chlorite gonflante. Pour SALLES (2006), la chlorite est non gonflante alors que la smectite est gonflante. Cependant, il peut avoir des cas particuliers de chlorite gonflante comme dans cette présente étude (WETSHONDO, 2012). D'ailleurs, la présence de chlorite gonflante a été signalée dans des roches kimberlitiques altérées à Toubabouko, dans la région de Séguéla, au Nord de la Côte d'Ivoire par CASANOVA & KNOPF (1969). Ces roches sont, certes, sur le socle cristallin, mais l'on sait que les détritiques qui alimentent la sédimentation du bassin sédimentaire ivoirien proviennent principalement du socle cristallin voisin. Cela renforce donc la probabilité de trouver des chlorites gonflantes au niveau du bassin sédimentaire et donc dans les sols de Grand-Lahou. Une chlorite gonflante est une chlorite où les feuillets brucitiques ne sont pas parfaitement développés, ce qui implique que certains ions hydroxyles sont remplacés par des molécules d'eau (CASANOVA & KNOPF, 1969). Ainsi, selon BULTEL (2003), certaines chlorites ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins comme les smectites telles que la montmorillonite.

Ces assertions sont en phase avec nos résultats qui expliquent la hausse de la densité sèche avec celle de la teneur en eau.

En ce qui concerne la portance CBR à 95% de l'OPM à quatre jours d'immersion dans l'eau, les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo CBR variant de (45 - 117), de Songon CBR variant (46 - 94) et de Bingerville CBR variant de (35 - 94) ont des densités sèches (γ_d) qui oscillent entre 1,9 - 2,1 ; avec les sables argileux de Bingerville ayant la plus grande densité sèche 1,94 à 2,03. L'ajout du mélange chaux et ciment à des sables argileux améliore les caractérisations physiques et mécaniques dont principalement la portance CBR à quatre jours d'immersion dans l'eau. Cela est confirmé par AUTRET (1983) ; MOOR (1987) ; BELL (1996) et BASHA et *al.* (2005). Ces auteurs rapportent que l'amélioration des propriétés mécaniques des sols argileux est due aux réactions d'hydratation du ciment produisant des CSH qui lient les particules du sol entre elles d'une part, et, d'autre part, par les réactions pouzzolaniques entre les minéraux argileux et le Ca(OH)_2 . Ces paramètres s'améliorent avec le temps compte tenu de la consolidation du CSH avec le temps.

CONCLUSION PARTIELLE

Les différents traitements, des sables argileux, aux mélanges chaux et ciment (pourcentage de sables argileux plus pourcentages de chaux et ciment) soumis à l'Essai Proctor Modifié d'où sont définies les différentes courbes Proctor modifiées de ces mélanges, ont permis de mettre en évidence l'influence du traitement aux mélanges chaux et ciment sur la matière première. En effet, l'amélioration des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment, a été observée, aussi bien, sur les densités sèches (γ_d) que sur les indices CBR à 95% de l'OPM à quatre jours d'immersion dans l'eau.

En outre, ce chapitre VI consacrée aux traitements des sables argileux aux mélanges chaux et ciment des localités de Grand-Lahou, Samo, Songon et Bingerville a montré que le traitement aux mélanges chaux et ciment à des sables argileux dominés par une fraction fine pourrait accroître leurs caractérisations mécaniques.

CHAPITRE VII. CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANQUES DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT

Les propriétés mécaniques des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment dépendent principalement des caractéristiques physiques (la granulométrie, la plasticité et la matrice minérale) d'une part, et d'autre part des liaisons développées par le contact argile, grains chaux et ciment.

Pour cette caractérisation des propriétés mécaniques de ces sables argileux, l'on évaluera dans cette partie, la résistance à la compression et à la traction des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment à court terme à 28 jours, à moyen terme à 90 jours puis à long terme à 360 jours de cure dans l'eau.

VII.1. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A COURT, MOYEN ET LONG TERME

VII.1.1. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 28 JOURS DE CURE DANS L'EAU

L'évaluation à différents âges des résistances à la compression et à la traction des sables argileux étudiés sont représentées sur différentes figures ci-après.

L'analyse de ces différentes figures met en évidence l'évolution de la variation du comportement des éprouvettes à trois niveaux. Il s'agit de :

- le niveau dit de phase ascendante qui représente le comportement linéaire du matériau.

Dans cette partie, l'on constate une forte progression des résistances.

- Le niveau dit de phase de rupture correspond à un point de rupture et qui représente la fin du comportement plastique du matériau ; cette partie se situe au sommet de la courbe et représente la partie concave de la courbe.

- Le niveau dit de phase descendante, cette dernière partie, représente le comportement visqueux d'écoulement plastique du matériau. C'est-à-dire, la zone du domaine très plastique ou irréversible qui est caractérisée par de très faibles résistances.

-

VII.1.1.1. Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment

A l'observation de la figure 51, l'on peut noter que, quelle que soit la teneur en mélange chaux et ciment, le comportement des éprouvettes reste en général élastique jusqu'à la rupture.

En compression à 28 jours de cure dans l'eau, il y'a une grande susceptibilité des sables argileux à se déformer.

L'on s'aperçoit qu'au niveau des sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6) et des sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1), on applique respectivement des contraintes comprises entre 0,7 - 3,19 MPa et 0,3 - 1,3 MPa pour avoir des déformations allant de 0,0015 à 0,0005.

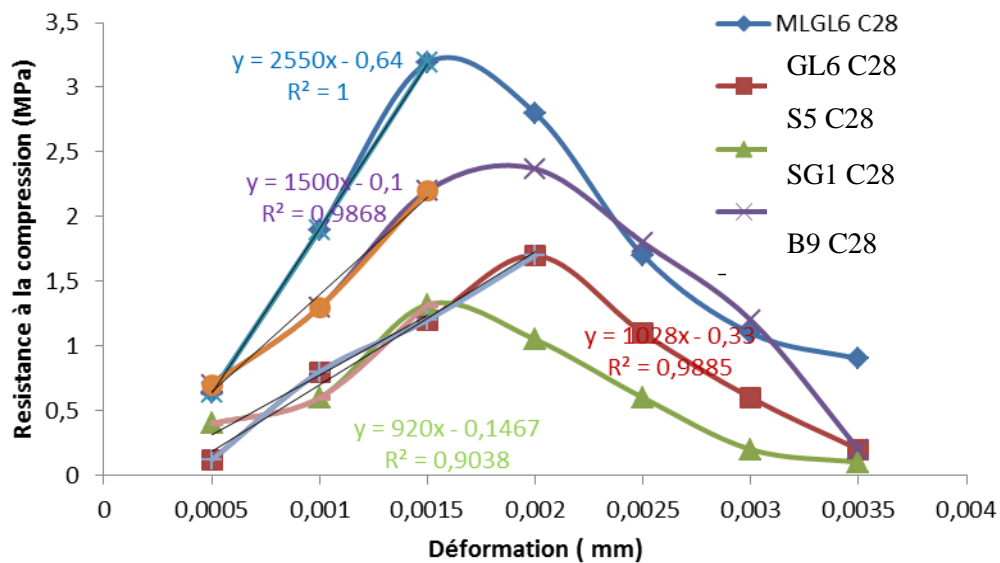


Figure 51 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.

En ce qui concerne les sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9), et les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) l'on a obtenu une déformation entre 0,7 - 2,37 MPa pour les sols de Bingerville et entre 0,1 - 1,7 MPa pour les sables argileux de Samo.

Au-delà des valeurs de contraintes limites, l'on assiste à la rupture des éprouvettes qui se caractérise par la chute immédiate des contraintes.

Il s'agit respectivement pour le sol de Grand-Lahou traité au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6), c'est-à-dire, pour des contraintes de 3,19 à 1,2 MPa, l'on note des déformations causées de l'ordre de 0,0015 à 0,0035 MPa.

Les mêmes déformations sont obtenues sur les sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9) et soumis à des contraintes de 2,37 à 0,2 MPa pour des déformations causées de 0,0015 à 0,0035.

Ces mêmes déformations sont obtenues sur les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) pour des contraintes de 1,7 à 0,2 MPa ainsi que de 1,6 à 0,1 MPa pour les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1).

VII.1.1.2. Evolution de la résistance à la traction à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment

La figure 52 ci-après, montre qu'en traction à 28 jours de cure dans l'eau, les résistances augmentent.

Au niveau des sables argileux de grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6), des contraintes appliquées de 0,02 MPa à 0,22 MPa ont entraîné des déformations allant de 0,0015 à 0,0005. Ces mêmes déformations sont obtenues au niveau des sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9), pour des contraintes de 0,2 MPa et 0,25 MPa.

Puis, au niveau des sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) et soumis à des contraintes de 0,01 à 0,24 MPa. Enfin, au niveau des sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux avec 2% de ciment (SG1), des contraintes de 0,02 à 0,16 MPa ont causé les mêmes déformations de 0,0015 à 0,0005.

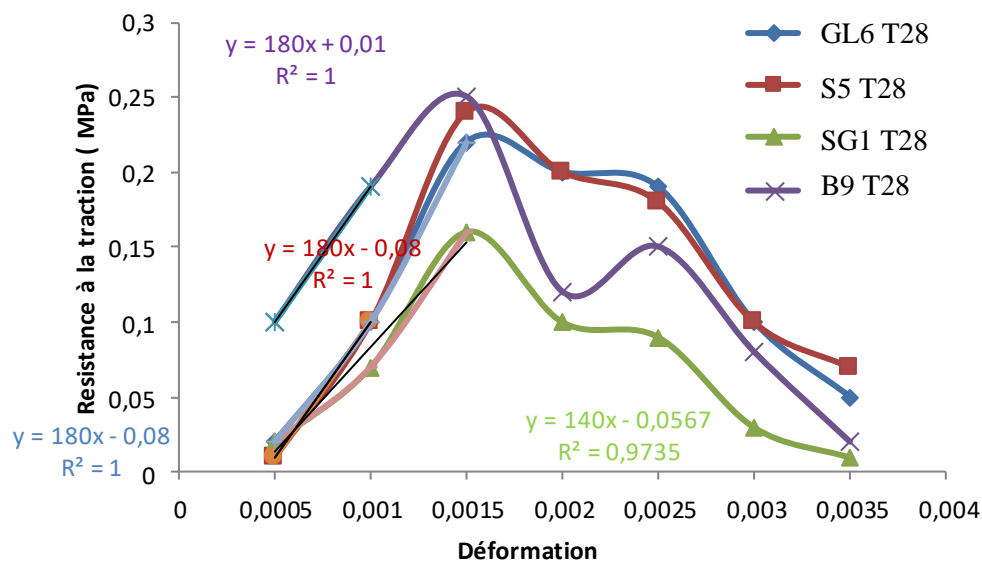


Figure 52 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 28 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges à la chaux et ciment.

Au-delà des valeurs de contraintes limites, il s'en suit la rupture des éprouvettes qui se caractérise par la chute immédiate des valeurs.

Il s'agit, en premier lieu des sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6), pour des déformations causées de 0,0015 à 0,0035 correspondant à des contraintes de 0,22 à 0,02 MPa, tandis que, pour les sables argileux de

Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9), produisant des contraintes de 0,25 à 0,02 MPa entraînent les mêmes déformations de 0,0015 à 0,0035. Les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) se sont largement déformés sous l'effet des contraintes comprises entre 0,24 MPa et 0,07 MPa entraînant les mêmes déformations.

Concernant les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1) ; pour des contraintes de 0,16 MPa à 0,01 MPa, les déformations restent constantes.

Au sommet de chaque courbe se situe la résistance à la compression ; une valeur caractéristique du traitement du sol au mélange chaux et ciment.

VII.1.2. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 90 JOURS

VII.1.2.1. Evolution de la résistance à la traction à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment

Sur la figure 53 ci-après, l'on observe que l'ajout du mélange chaux et ciment dans les différents sables argileux provoque une variation de la résistance à la traction mécanique.

Concernant les sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6), pour des contraintes de 0,15 et 0,45 MPa, correspondant à des déformations allant de 0,0005 à 0,002 ; la résistance augmente (domaine de résistance croissante).

On voit aussi que, pour les autres sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment des autres localités :

- 0,1 MPa et 0,4 MPa pour les sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9) avec des déformations allant de 0,0005 à 0,002,
- 0,05 MPa et 0,25 MPa pour les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et de 4% de ciment (S5) pour des déformations variant de 0,0005 à 0,002 et enfin,
- 0,01 MPa et 0,14 MPa pour les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1) dont les déformations passent de 0,0005 à 0,002.

Le pic de chaque courbe correspond à la résistance à la rupture. Cette résistance à la rupture varie en fonction du type de sol et la partie descendante des courbes correspond au domaine de résistance décroissante. Elle montre une baisse de la résistance à la traction.

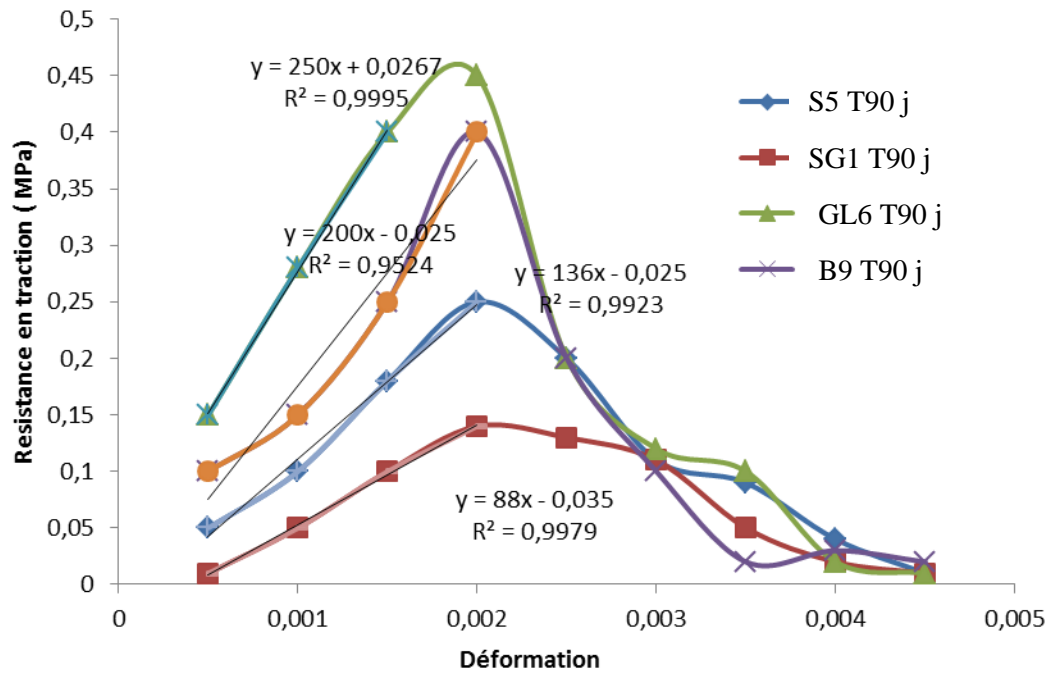


Figure 53 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment.

VII.1.2.2. Evolution de la résistance à la compression à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment

L'analyse des figures 53 ci-dessus et 54 ci-dessous, montre que le comportement des éprouvettes varie également à trois niveaux.

Une partie ascendante du comportement linéaire jusqu'à la rupture, un point de rupture correspondant au début phase plastique et enfin une phase descendante c'est-à-dire la phase des plus faibles contraintes.

Ces figures montrent, également que, l'évolution des courbes est identique, quelle qu'en soit la teneur en chaux et ciment pour un même sol, mais elle varie selon la nature du sable argileux ; cela est dû à la composition granulométrique et du type d'argile.

La résistance mécanique d'un matériau de construction en général est l'une des propriétés les plus importantes.

La stabilité de l'infrastructure réalisée en dépend énormément (SOULEY, 2016). Les différentes courbes montrent que la résistance à la compression à 90 jours varie en fonction de la teneur en chaux et ciment.

Pour la compression, les résistances augmentent respectivement, au niveau des sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9), pour des contraintes de 0,3 MPa et 2,78 MPa et on note des déformations de 0,0005 à 0,0025 tandis que, les sables

argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) subissent des déformations de 0,0005 à 0,0025 à des contraintes de 0,3 à 2,34 MPa.

Concernant les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1), des contraintes de 0,3 à 2,34 MPa leur confèrent des déformations de 0,0005 à 0,0035.

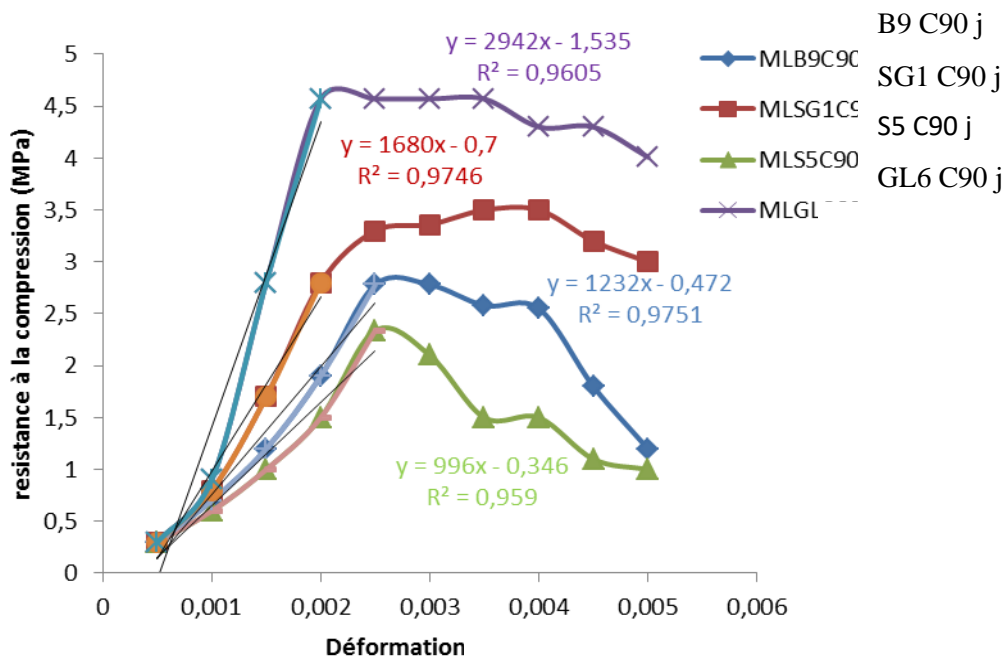


Figure 54 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 90 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.

Enfin, s'agissant des sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6), il a fallu des contraintes de 0,3 à 4,57 MPa pour des déformations de 0,0005 à 0,0025.

Au-delà de toutes ces valeurs citées ci-dessus, on assiste à la rupture qui se caractérise par la chute de ces valeurs.

Il s'agit respectivement des valeurs qui vont de 4,5 à 4,01 MPa pour les sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6) ; puis, de 3,5 à 3 MPa pour les sables argileux traités au mélange de Bingerville de 3% de chaux et 6% de ciment (B9) ; ensuite, de 2,78 à 1,8 MPa pour les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5) et enfin, de 2,34 à 1 MPa pour les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1).

Au sommet de chaque courbe se situe la résistance à la compression ; une valeur caractéristique du traitement au mélange chaux ciment ayant des valeurs de résistance

respectivement égales à 4,5 et 3,5 pouvant être qualifiées de plus résistantes. Cet aspect de résistance, est intrinsèque au matériau, il est révélé, sous l'action de l'eau au bout de 4 jours d'immersion.

Les premières valeurs de résistance à la compression sont obtenues à partir de 2% de chaux et 6% de ciment.

Les deuxièmes valeurs de résistance à la compression sont obtenues à partir de 3% de chaux et 6% de ciment.

Cette baisse de résistance est plus importante pour les éprouvettes réalisées avec les sables argileux de Songon et de Samo qui vont respectivement de 0,14 à 0,02 MPa et de 0,25 à 0,04 MPa.

A travers le tableau XXVI ci-après, l'on retient que la résistance à la compression et la résistance à la traction dépendent d'un certain nombre de paramètres ; particulièrement la durée et donc du temps de cure.

Pour les sables argileux traités avec des mélanges de chaux et ciment, les valeurs de résistance à la traction à 28 jours de cure sont inférieures à sensiblement égales aux valeurs de résistance à la traction à 90 jours de cure dans l'eau.

Ainsi, les sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment de Songon, Samo, Bingerville et Grand-Lahou après traitement, présentent à 28 jours et à 90 jours des résistances à la traction respectivement de 0,14 à 0,15 MPa ; 0,24 à 0,25 MPa ; 0,25 à 0,4 MPa et enfin, 0,25 à 0,45 MPa.

En ce qui concerne la résistance à la compression à 28 jours et à 90 jours de cure dans l'eau, on note des valeurs allant de 1,32 à 3,5 MPa pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon ; de 1,7 à 2,34 MPa, pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo pendant qu'elles varient de 3,19 à 4,57 MPa pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou et enfin, pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville, varient de 2,37 à 2,78 MPa.

VII.1.3. EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT A 360 JOURS DE CURE DANS L'EAU

VII.1.3.1. Evolution de la résistance à la traction à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment

La figure 55 ci-dessous, montre que l'incorporation du mélange chaux et ciment dans les sables argileux permet une variation de la résistance à la traction mécanique au niveau de tous les sols.

Il s'agit de la phase allant de 0,15 à 0,84 MPa pour les sables argileux de Grand-Lahou traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment (GL6). Dans cet intervalle la résistance augmente (domaine de résistance croissante). On remarque que les résistances sont fonctions des types de sables argileux. Ensuite, l'on a : 0,1 à 0,81 MPa, pour les sables argileux de Bingerville traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment (B9). Puis : 0,05 à 0,37 MPa pour les sables argileux de Samo traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment (S5). Et enfin : 0,01 et 0,75 MPa pour les sables argileux de Songon traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment (SG1).

La partie qui correspond au sommet de chaque courbe est la résistance à la rupture des sables argileux étudiés.

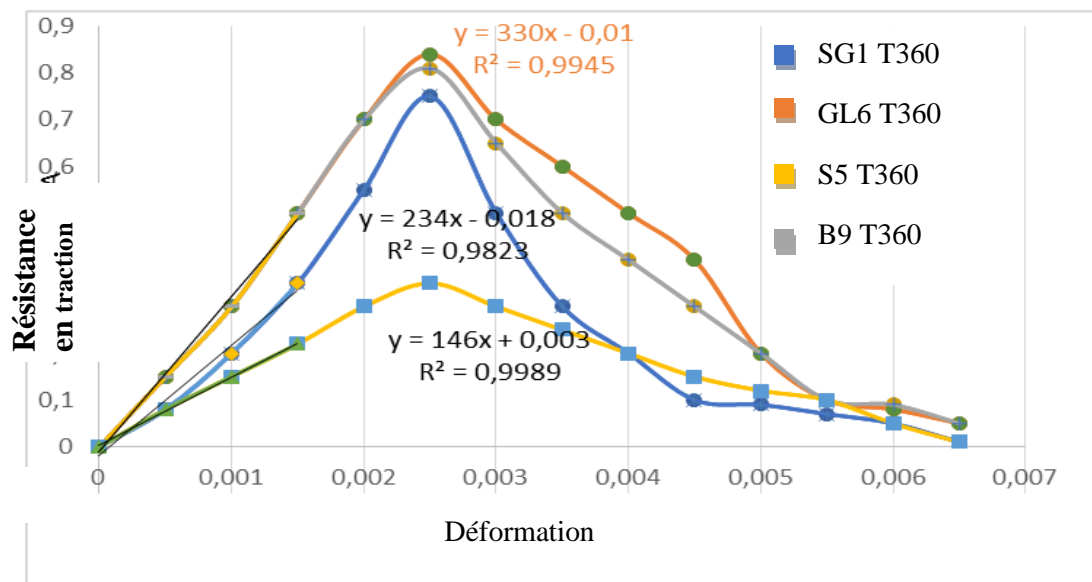


Figure 55 : Evolution des variations de la traction en fonction des déformations à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges à la chaux et ciment.

Ici, la résistance à la rupture varie en fonction du type de sables argileux et la partie droite de nos courbes correspond au domaine de résistance décroissante qui reste la phase d'écoulement plastique du matériau. Elle montre une baisse de la résistance à la traction.

VII.1.3.2. Evolution de la résistance à la compression à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment

L'analyse de la figure 56 ci-dessous, indique que le comportement des éprouvettes varie également suivant trois phases. L'on constate une phase ascendante jusqu'à la rupture appelée : phase élastique, un point de rupture correspondant à la phase plastique et enfin une phase descendante, c'est-à-dire, la phase des plus faibles contraintes non réversibles.

Cette figure montre également que l'allure des courbes est identique quelle que soit la teneur en chaux et ciment pour un même sol, mais elle varie avec la nature du sable argileux. Cela est dû à la composition granulométrique des sables argileux qui diffère selon les diamètres des grains. Les différentes courbes de la figure 56 montrent que la résistance à la compression à 360 jours de cure varie en fonction de la teneur en chaux et ciment.

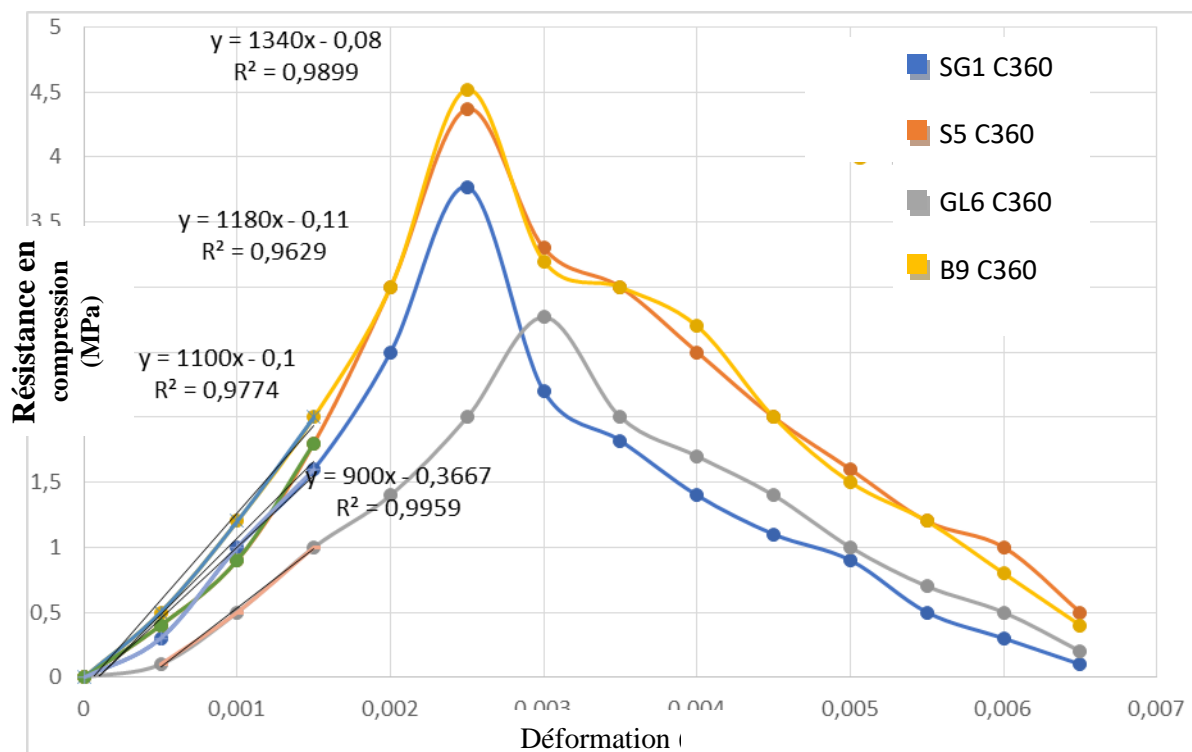


Figure 56 : Evolution des variations de la compression en fonction des déformations à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment

Pour la compression, les résistances augmentent respectivement au niveau des sables argileux de Bingerville (B9) traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment pour des contraintes de 0,5 à 4,52 MPa et on note des déformations de 0,0005 à 0,0025 tandis que, les sables argileux de Samo (S5) traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment subissent des déformations de 0,0005 à 0,0025 à des contraintes de 0,3 à 4,37 MPa.

Concernant les sables argileux de Songon (SG1) traités au mélange de 1% de chaux et 3% de ciment pour des contraintes de 0,3 à 3,77 MPa, celles-ci leur confèrent des déformations de 0,0005 à 0,0035.

S'agissant des sables argileux traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment de Grand-Lahou (GL6), il a fallu des contraintes de 0,3 à 2,77 MPa pour des déformations de 0,0005 à 0,0025.

Au-delà de toutes ces valeurs citées ci-dessus, il y'a la rupture qui se caractérise par la chute de ces valeurs. Il s'agit respectivement des valeurs qui vont de 2,77 à 0,5 MPa pour les sables argileux de Grand Lahou (GL6) traités à 2 % de chaux et 6% de ciment ; puis de 4,52 à 0,8 MPa pour les sables argileux traités de Bingerville (B9) de 3% de chaux et 6% de ciment ensuite, de 4,32 à 0,8 MPa pour les sables argileux de Samo (S5) traités avec 2% de chaux et 4% de ciment et enfin, de 3,77 à 0,1 MPa pour les sables argileux de Songon (SG1) traités avec 1% de chaux et 2% de ciment.

Au sommet de chaque courbe, se situe la résistance à la compression ; une valeur caractéristique du traitement des sables argileux aux mélanges chaux et ciment ayant des valeurs de résistance respectivement égales à 4,52 MPa et 4,37 MPa et peuvent être qualifiées de plus résistantes.

Les premières valeurs de résistance à la compression sont obtenues à partir de 3% de chaux et 6 % de ciment.

Les deuxièmes valeurs de résistance à la compression sont obtenues à partir de 2% de chaux et de 4% de ciment.

Cette baisse de résistance est plus importante pour les éprouvettes réalisées avec les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon (SG1) et de Samo (S5) respectivement qui vont de 0,75 à 0,02 MPa et de 0,37 à 0,04 MPa.

Tableau XXVI : Synthèse des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment et résistances à la rupture à différents âges de cure.

Sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.					
Résistance à la rupture		SG1	S5	B9	GL6
A 28	RC (MPa)	1,32	1,70	2,37	3,19
jours	RT (MPa)	0,14	0,24	0,25	0,25
A 90	RC (MPa)	3,50	2,34	2,78	4,57
jours	RT (MPa)	0,15	0,25	0,40	0,40
A 360	RC (MPa)	2,77	4,37	4,52	3,77
jours	RT (MPa)	0,75	0,77	0,81	0,84

SG1 (1% chaux et 2% ciment et 97% sables argileux de Songon), S5 (2% chaux et 4% ciment et 94% sables argileux de Samo), B9 (3% chaux et 6% ciment et 91% sables argileux de Bingerville), GL6 (2% chaux et 6% ciment et 92% sables argileux de Grand-Lahou).

Sur le tableau XXVI ci-dessus, il faut retenir que la résistance à la compression et la résistance à la traction des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment, dépendent d'un certain nombre de paramètres et particulièrement du temps d'immersion de l'éprouvette dans l'eau.

Pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment, les valeurs de résistances à la traction à 28 et 90 jours de cure dans l'eau sont inférieures aux valeurs de résistance à la traction et à la compression à 360 jours de cure dans l'eau.

Au niveau des résistances à la compression, les valeurs connaissent, aussi, une augmentation à 28, 90 et 360 jours de cure dans l'eau à l'exception des résistances à la compression à 360 jours de cure des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon SG1 et de Grand-Lahou GL6 qui sont inférieures à celles de 90 jours de cure.

Ainsi, les sables argileux de Songon, Samo, Bingerville et Grand-Lahou, après traitement aux mélanges chaux et ciment présentent à 90 jours et à 360 jours de cure dans l'eau des résistances à la traction respectivement de 0,15 à 0,75 MPa ; 0,25 à 0,77 MPa ; 0,4 à 0,81 MPa et enfin ; 0,45 à 0,84 MPa.

En ce qui concerne la résistance à la compression à 90 jours et à 360 jours de cure dans l'eau, on note des valeurs allant de 3,5 à 2,77 MPa pour les sables argileux de Songon ; 2,34 à 4,37

MPa pour les sables argileux de Samo ; pendant qu'elles varient de 4,57 à 3,77 MPa pour les valeurs à la compression des sables argileux de Grand-Lahou et enfin ; pour les sables argileux de Bingerville, elles varient de 2,78 à 4,52 MPa.

VII.2. EVALUATION DES MODULES DE YOUNG DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT

La déformation élastique d'un élément cubique donne un rapport constant, de la contrainte à la déformation appelé module élastique E (ou module de Young) ; c'est un paramètre qui caractérise le matériau.

Toutes les déformations sont inscrites dans le tableau ci-dessous pour chaque matériau donné.

Tableau XXVII : Module de Young des sables argileux traités aux mélanges de Chaux et ciment déterminé à partir des évolutions contrainte-déformation.

Sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment	GL6	B9	S5	SG1
Module de Young à T28 j	180	180	180	140
Module de Young à C28 j	2 550	1 028	920	720
Module de Young à T90 j	250	200	136	88
Module de Young à C90 j	2 942	1 232	996	1 680
Module de Young à T360 j	300	330	146	234
Module de Young à C360 j	900	1 340	1 180	1 100

C : Compression. ; T : Traction ; j : jour

En regardant le tableau XXVII, l'on constate que les valeurs du module de Young des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment varient respectivement entre 88 et 250 MPa pour les tractions, entre 996 et 2 942 MPa pour les compressions à 90 jours de cure dans l'eau. Puis, entre 140 à 180 MPa pour les tractions et entre 720 à 2 550 MPa pour les compressions à 28 jours de cure dans l'eau.

A 360 jours de cure dans l'eau, les modules de Young varient entre 900 à 1 340 pour la compression des éprouvettes et entre 146 à 330 MPa pour la traction des éprouvettes.

Les modules de Young varient d'un sable argileux à un autre et renseignent sur l'état de déformabilité des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment avec des proportions de mélanges variables.

VII.3. EVALUATION DES COEFFICIENTS DE POISSONS DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT

Afin de bien saisir l'importance de ce constat, déterminons les coefficients de poisson des différentes éprouvettes selon le numéro de dosage du sol (tableau XXVIII).

Tableau XXVIII : Récapitulatif des Coefficients de poisson des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment à différents âges de cure.

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment	GL6	B9	S5	SG1
Coefficient de poisson à T28j	0,22	0,21	0,21	0,20
Coefficient de poisson à C28j	0,24	0,20	0,25	0,21
Coefficient de poisson à T90j	0,25	0,22	0,26	0,24
Coefficient de poisson à C90j	0,27	0,27	0,21	0,25
Coefficient de poisson à T360j	0,25	0,22	0,26	0,24
Coefficient de poisson à C360j	0,27	0,27	0,25	0,25

GL6 = sol de Grand-Lahou traité à 2% de chaux et 6% de ciment

B9 = sol de Bingerville traité à 3% de chaux et 6% de ciment

S5 = sol de Samo traité à 2% de chaux et 4% de ciment

SG1 = sol de Songon traité à 1% de chaux et 2% de ciment

L'on remarque sur le tableau XXVIII ci-dessus, que les coefficients de poisson varient également d'un matériau à un autre et sont fonction des différents traitements aux mélanges chaux et ciment. Il s'agit des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou (GL6), de Bingerville (B9), de Samo (S5), et de Songon (SG1). L'on note que pour ces sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment, les coefficients de poisson en traction varient : de 0,22 à 0,25 pour les sables argileux de Grand-Lahou (GL6), de 0,21 à 0,22 pour les sables argileux de Bingerville (B9) ensuite, de 0,21 à 0,26 pour les sables argileux traités

aux mélanges de chaux et ciment de Samo (S5) et enfin, de 0,2 à 0,24 pour les sables argileux traités au mélange de chaux et ciment de Songon (SG1) à des tractions respectives à 28 jours et à 90 jours d'immersion dans l'eau.

L'on constate que ces valeurs évoluent très peu lorsque c'est la traction à 360 jours d'immersion dans l'eau.

A 360 jours, les coefficients de poisson à la traction sont : 0,25 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Grand-Lahou (GL6) ; 0,22 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Bingerville (B9) ; 0,26 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Samo (S5) et 0,24 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Songon (SG1).

En compression, les valeurs des coefficients de poisson vont de 0,24 à 0,27 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Grand-Lahou (GL6) ; de 0,2 à 0,27 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Bingerville (B9) ensuite de 0,21 à 0,25 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Samo (S5) et enfin de 0,21 à 0,25 pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Songon (SG1). Et ce, respectivement à 28 ; 90 et 360 jours d'immersion dans l'eau. Ces valeurs sont plus grandes en compression qu'en traction.

Ainsi, l'on a constaté lors des essais Proctor modifié et de portance CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion qui mettent en évidence la résistance des sables argileux traités au mélange chaux et ciment à partir des densités sèches (γ_d) et des portances CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion que ces deux paramètres (Proctor modifié, portance CBR) renseignent sur les aspects mécaniques contenus dans les matériaux et révélés sous l'action de l'eau au bout d'un temps d'immersion à 4 jours.

En connaissant ces deux paramètres, l'on a choisi les sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment suivants :

GL6 (Mélange de sables argileux de Grand-Lahou 92% traités à 2% de chaux et 6% de ciment), B9 (Mélange de sables argileux de Bingerville 91% traités à 3% de chaux et 6% de ciment), S5 (Mélange de sables argileux de Samo 94% traités à 2% de chaux et 4% de ciment) et SG1 (Mélange de sables argileux de Songon 97% traités à 1% de chaux et 2% de ciment). En fonction de ce choix, l'on a divisé la présente étude en quatre phases comme ci-dessous :

- Première phase GL6

Pour les éprouvettes des sables argileux traités de Grand-Lahou avec un mélange de 2% de chaux et 6% de ciment, l'on note une variation des coefficients de poisson de 0,22 à 0,25 quand elles subissent une traction à 28, 90 et à 360 jours de cure dans l'eau. Puis, une variation des coefficients de poisson de 0,24 à 0,27 quand elles subissent une compression à 28, 90 et 360 jours de cure dans l'eau.

Ces valeurs sont entre 0,15 et 0,25 qui sont les cas pratiques des sols traités avec le mélange des liants hydrauliques.

Des sols traités aux mélanges chaux et ciment ayant de telles valeurs de coefficients de poisson ont aussi des résistances relativement adaptées pour des couches d'assises de chaussées.

- Deuxième phase B9

Les sables argileux traités de Bingerville avec un mélange de 3% de chaux et 6% de ciment, donnent des coefficients de poisson situés entre 0,21 et 0,22 quand on leur applique une traction à 28, 90 et 360 jours de cure dans l'eau.

En compression à 28 jours, à 90 jours et à 360 jours de cure dans l'eau, les valeurs de coefficients de poisson sont entre 0,2 et 0,27.

Ces valeurs sont également dans la plage 0,15-0,25 des sols traités aux mélanges de liants hydrauliques et donc acceptables d'être utilisés comme assise de chaussée.

- Troisième phase S5

Les sables argileux de Samo nécessitent un traitement avec un mélange de 2% de chaux et 4% de ciment pour qu'ils atteignent des caractérisations exigées par la norme en technique routière.

Il s'agit, entre autres, des coefficients de poisson qui passent de 0,21 à 0,25 lorsqu'on leur applique une compression à 28, 90 puis à 360 jours de cure dans l'eau.

Puis, des valeurs de coefficients de poisson à la traction de 0,21 à 0,26 à 28, 90 puis 360 jours de cure dans l'eau.

L'on note une parfaite corrélation de ces résultats par rapport à la plage de valeurs autorisée par la norme de construction routière ; c'est-à-dire des valeurs comprises entre 0,15 et 0,25.

Ces sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment sont susceptibles d'être utilisés en couche d'assise de chaussée.

- et quatrième phase SG1

Les sables argileux de Songon qui nécessitent un traitement avec un mélange de 1% de chaux et 2% de ciment pour avoir des caractérisations adaptées telles que les coefficients de poisson qui passe de 0,2 à 0,24 lorsqu'ils subissent une traction à 28, 90 et 360 jours de cure dans l'eau.

Ces coefficients de poisson passent de 0,21 à 0,25 lorsqu'ils subissent une compression à 28, 90 puis à 360 jours de cure dans l'eau. Ce numéro de dosage en chaux et ciment est donc celui qu'il faut aux sables argileux de Songon pour son utilisation en couche d'assise de chaussée.

VII.4. DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRESPONDANCE Rt360/Rt90 ET Et360/Et90 DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT

La détermination des coefficients de correspondance R_{t360}/R_{t90} et E_{t360}/E_{t90} aux fins d'établir une corrélation entre les effets de l'action du mélange chaux et ciment, à moyen et long terme, sur les différents sables argileux immergés dans l'eau, a permis d'établir le tableau XXIX ci-dessous.

Tableau XXIX : Coefficients de correspondance R_{t360}/R_{t90} et E_{t360}/E_{t90} des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.

Sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment	GL6	B9	S5	SG1
R_{t360}/R_{t90}	1,85	2	3	5
E_{t360}/E_{t90}	1,2	1,6	1,1	2,6

R_t=Résistance à la traction. E_t= Module de Young à la traction

Il ressort de ce tableau ci-dessus que : les coefficients de correspondance des résistances à la traction à 360 et 90 jours de cure dans l'eau (R_{t360}/R_{t90}) et les coefficients de correspondance des modules de Young (E) à la traction à 360 et 90 jours de cure dans l'eau (E_{t360}/E_{t90}) varient d'un sable argileux à un autre sable argileux et vont de 1,85 à 5 pour R_{t360}/R_{t90} et de 1,1 à 2,6 pour E_{t360}/E_{t90} .

L'on remarque que toutes ces valeurs, des coefficients de correspondance, sont supérieures à 1. Cela dénote que les valeurs des résistances à la traction et les modules de Young à la traction à 360 jours d'immersion dans l'eau, restent plus grandes à celles des résistances à la traction et des modules de Young à la traction à 90 jours d'immersion dans l'eau.

Cet état signifierait que l'action du temps de cure dans l'eau a eu un effet sur le temps de prise du mélange chaux et ciment des différents sables argileux traités sous différents dosages de chaux et de ciment.

Les sables argileux de Songon (SG1) traités au mélange de 1% de chaux et 2% de ciment à le coefficient de correspondance R_{t90}/R_{t360} le plus élevé 5 suivi, bien après, des sables argileux de Samo (S5) traités au mélange de 2% de chaux et 4% de ciment qui donne 3 comme valeur, puis, des sables argileux de Bingerville (B9) traités au mélange de 3% de chaux et 6% de ciment dont la valeur est 2 et enfin, les sables argileux de Grand-Lahou (GL6) traités au mélange de 2% de chaux et 6% de ciment dont la valeur est 1,85.

L'on a traité les sables argileux aux mélanges de chaux et ciment ce qui a permis d'obtenir les paramètres mécaniques sur ces sols. Il faut regarder leur application dans le dimensionnement de structures de chaussée lorsqu'ils sont associés aux trafics et la classe du sol de plateforme.

VII.5. APPLICATION DES RESULTATS AU DIMENSIONNEMENT DE STRUCTURES DE CHAUSSEE

L'étude du trafic a été faite sur la base de vingt (20) ans correspondant à la durée de vie de l'ouvrage.

Celle-ci tient compte d'une croissance linéaire de 6%. Le trafic est estimé à 124 PL/J dans les deux sens et 62 PL/J/sens.

Le trafic cumulé poids lourds est de $7,1.10^5$ PL en considérant le nombre d'essieux équivalent de 13 tonnes.

Le trafic cumulé poids lourds correspond à la classe T2 du CEBTP (1984). Car se trouvant entre 5.10^5 et $1,5.10^6$. Enfin, le risque (r) pris est égal à 7,5%.

Tous ces paramètres sont donnés par les guides de dimensionnement des chaussées (LCPC, 1994).

**VII.5.1. DETERMINATION DES CONTRAINTES ET
DEFORMATIONS ADMISSIBLES A L'AIDE
DU CODE ALIZE**

Les tableaux XXX et XXXI respectivement ci-dessous présentent les valeurs des contraintes et des déformations admissibles des différents matériaux de chaussée.

Tableau XXX : Valeurs des contraintes et des déformations admissibles des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment de Grand Lahou et Bingerville

Matériaux	Module E (MPa)	CAM	NE (PL)	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.adm}$ 10^{-6}(MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ 10^{-6}(MPa)
Sol Support	75	1	$7,1058 \cdot 10^5$	-	-	602,7
STLH	300 et 330	1,3	$9,2375 \cdot 10^5$	0,822	-	-
SC	1500	1,3	$9,2375 \cdot 10^5$	0,822	-	-
SB	1000	0,8	$5,6846 \cdot 10^5$	-	315,10	-
MB	3000	0,8	$5,6846 \cdot 10^5$	-	242,40	-

STLH : Sol Traité aux Liants Hydrauliques ; SC : Sol Ciment. SB : Sol Bitumineux ; MB : Mortier Bitumineux.

Tableau XXXI : Valeurs des contraintes et des déformations admissibles des sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment de Songon et Samo

Matériaux	Module E (MPa)	CAM	NE (PL)	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.adm}$ 10^{-6}(MPa)	$\epsilon_{z.alz}$ 10^{-6}(MPa)
Sol Support	75	1	$7,1058 \cdot 10^5$	-	-	602,7
STLH	334 et 146	1,3	$9,2375 \cdot 10^5$	0,904	-	-
SC	1500	1,3	$9,2375 \cdot 10^5$	0,904	-	-
SB	1000	0,8	$5,6846 \cdot 10^5$	-	315,10	-
MB	3000	0,8	$5,6846 \cdot 10^5$	-	242,40	-

STLH : Sol Traité aux Liants Hydrauliques ; SC : Sol Ciment. SB : Sol Bitumineux ; MB : Mortier Bitumineux.

VII.5.2. COMPARAISON DES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ADMISSIBLES AUX VALEURS DU CODE ALIZE

VII.5.2.1. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour Grand-Lahou

Les différents tableaux suivants présentent les tests comparatifs des données calculées et des valeurs admissibles données par le logiciel ALIZE.

Il s'agit de déterminer la composition et l'épaisseur de chacune des couches permettant de satisfaire aux contraintes et déformations admissibles. Ces épaisseurs ont été déterminées en tenant compte de la classe de trafic. Celle-ci indique un trafic cumulé poids lourds de $7,10 \cdot 10^5$ PL sur sa durée de vie à l'horizon. Egalement, la portance CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau du sol de plate-forme et la disponibilité de la matière première (sable argileux) ont été des éléments déterminants, selon la norme du CEBTP (1984).

Concernant le sol de Grand-Lahou deux structures ont été déterminées, le résultat du calcul donne une structure constituée comme l'indique les tableaux XXXII et XXXIII ci-dessous et ci-après.

Tableau XXXII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou 1.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
Sol Support	602,7	575,0	Déformation acceptable
	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\sigma_{t.alz}$ (MPa)	
SACC	0,822	0,079	Contrainte acceptable
SC (4%)	0,822	0,382	Contrainte acceptable
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
SA	242,40	18,3	Déformation acceptable

L'on a donc, défini comme première structure de chaussée pour la zone de Grand-Lahou les épaisseurs suivantes : quatre (4) cm pour la couche de roulement en Sand Asphalt (SA) ; dix-huit (18) cm d'épaisseur pour la couche de base en Sable-Ciment (SC) et vingt (20) cm de Sable Argileux Traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 2% de chaux et 6% de ciment (GL6) pour la couche de fondation.

La deuxième structure se compose selon le tableau XXXIII ci-dessous.

Pour cette deuxième structure de chaussée de la zone de Grand-Lahou ; l'on définit les épaisseurs suivantes : quatre (4) cm pour la couche de roulement en Sand asphalt (SA) ; vingt (20) cm d'épaisseur pour la couche de base en Sable-Bitume (SB) et vingt (20) cm de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC), soit 2% de chaux et 6% de ciment (GL 6), pour la couche de fondation.

Les déformations et les contraintes calculées par ALIZE-LCPC (Tableau XXXII et XXXIII) sont inférieures aux valeurs admissibles.

Cela suggère que ces structures peuvent être envisagées dans la zone de Grand-Lahou.

Tableau XXXIII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou 2.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
Sol Support	602,7	579,4	Déformation acceptable
	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\sigma_{t.alz}$ (MPa)	
SACC	0,822	0,081	Contrainte acceptable
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
SB (4%)	315,10	223,8	Contrainte acceptable
SA	242,40	18,3	Déformation acceptable

VII.5.2.2. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Songon

Les tests comparatifs des contraintes et déformations pour la première structure de chaussée de la zone de Songon donne : trois (3) cm d'épaisseur pour la couche de roulement en Sand Asphalté (SA) ; quinze (15) cm d'épaisseur pour la couche de base en Sable-Ciment (SC) dosé à 4% et dix-huit (18) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 1% de chaux et 2% de ciment (SG 1), pour la couche de fondation.

Par ailleurs, la deuxième structure de chaussée donne trois (3) cm d'épaisseur en Sand Asphalté (SA) pour la couche de roulement ; quinze (15) cm d'épaisseur en Sable-Bitume (SB) pour la couche de base et dix-huit (18) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 1% de chaux et 2% de ciment (SG 1) pour la couche de fondation.

Tableau XXXIV : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Songon 1.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
Sol Support	602,7	483,3	Déformation acceptable
	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\sigma_{t.alz}$ (MPa)	
SACC	0,904	0,036	Contrainte acceptable
SC (4%)	0,822	0,471	Contrainte acceptable
	$\epsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\epsilon_{t.alz}$ (MPa)	
SA	266,60	42,0	Déformation acceptable

Tableau XXXV : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux de Songon 2.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
Sol Support	602,7	519,7	Déformation acceptable
	σ t.adm (MPa)	σ t.alz (MPa)	
SACC	0,904	0,040	Contrainte acceptable
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
SB	346,60	304,8	Contrainte acceptable
SA	266,60	14,9	Déformation acceptable

Les déformations et les contraintes calculées par ALIZE-LCPC pour Songon (Tableau XXXIV et XXXV), ci-avant, sont inférieures aux valeurs admissibles. Ce qui traduirait que ces structures peuvent être conçues pour les routes de Songon.

VII.5.2.3. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Samo

En ce qui concerne la zone de Samo, les tests comparatifs des contraintes et déformations pour la première structure de chaussée donne : quatre (4) cm d'épaisseur pour la couche de roulement en Sand Asphalt (SA) ; vingt (20) cm d'épaisseur pour la couche de base en Sable-Ciment (SC) dosé à 4% et vingt (20) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 2% de chaux et 4% de ciment (S5), pour la couche de fondation.

Par ailleurs, la deuxième structure de chaussée utilisera : quatre (4) cm d'épaisseur en Sand asphalt (SA) pour la couche de roulement ; dix-huit (18) cm d'épaisseur en Sable-Bitume (SB) pour la couche de base et vingt (20) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 2% de chaux et 4% de ciment (S5), pour la couche de fondation.

Tableau XXXVI : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo 1.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
Sol Support	602,7	342,4	Déformation acceptable
	σ t.adm (MPa)	σ t.alz (MPa)	
SACC	0,904	0,010	Contrainte acceptable
SC	0,904	0,428	Contrainte acceptable
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
SA	266,60	14,9	Déformation acceptable

Tableau XXXVII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo 2.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
Sol Support	602,7	412,3	Déformation acceptable
	σ t.adm (MPa)	σ t.alz (MPa)	
SACC	0,904	0,015	Contrainte acceptable
	ε .adm (MPa)	ε .alz (MPa)	
SB	346,60	312,2	Déformation acceptable
SA	266,60	25,8	Déformation acceptable

Les déformations et les contraintes calculées par ALIZE-LCPC (Tableau XXXVI et XXXVII) sont inférieures aux valeurs admissibles.

Ce qui suggère que ces structures peuvent être envisagées dans la zone de Samo.

VII.5.2.4. Comparaison des contraintes et déformations admissibles aux valeurs du code ALIZE pour les sables argileux de Bingerville

Les tests comparatifs des contraintes et déformations pour la première structure de chaussée de la zone de Bingerville donne : cinq (5) cm d'épaisseur en Sand Asphalte (SA) pour la couche de roulement ; vingt (20) cm d'épaisseur en Sable-Ciment (SC) dosé à 4% pour la couche de base et vingt-cinq (25) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 3% de chaux et 6% de ciment (B9), pour la couche de fondation.

Par ailleurs, la deuxième structure de chaussée donne : quatre (4) cm d'épaisseur en Sand Asphalte (SA) pour la couche de roulement ; dix-huit (18) cm d'épaisseur de Sable-Bitume (SB) pour la couche de base et vingt-cinq (25) cm d'épaisseur de Sable Argileux traité au mélange Chaux et Ciment (SACC) soit 3% de chaux et 6% de ciment (B9) pour la couche de fondation.

Les déformations et les contraintes calculées par ALIZE-LCPC pour la zone de Bingerville (Tableau XXXVIII et XXXIX) sont inférieures aux valeurs admissibles.

Ce qui voudrait dire que ces structures peuvent être envisagées dans la zone de Bingerville.

Tableau XXXVIII : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville 1.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	$\varepsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\varepsilon_{t.alz}$ (MPa)	
Sol Support	602,7	572,9	Déformation acceptable
	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\sigma_{t.alz}$ (MPa)	
SACC	0,822	0,086	Contrainte acceptable
SC(4%)	0,822	0,030	Contrainte acceptable
	$\varepsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\varepsilon_{t.alz}$ (MPa)	
SA	242,40	226,0	Déformation acceptable

Tableau XXXIX : Tests comparatifs des contraintes et déformations des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville 2.

	Données		Résultats des tests comparatifs
	$\varepsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\varepsilon_{t.alz}$ (MPa)	
Sol Support	602,7	537,1	Déformation acceptable
	$\sigma_{t.adm}$ (MPa)	$\sigma_{t.alz}$ (MPa)	
SACC	0,822	0,082	Contrainte acceptable
	$\varepsilon_{t.adm}$ (MPa)	$\varepsilon_{t.alz}$ (MPa)	
SB	315,10	210,1	Déformation acceptable
SA	242,40	18,6	Déformation acceptable

VII.6. DISCUSSION

Les traitements des sables argileux aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou, Songon, Samo et Bingerville à différents âges de cure, influencent le comportement géotechnique de ces sols.

Tous ces sols étudiés sont enrichis en kaolinite et pauvre en illite, à l'exception des sols de Grand-Lahou qui sont dépourvus d'illite. Cela a favorisé l'amélioration des caractérisations géotechniques des sols traités aux mélanges chaux et ciment car selon LEROUX *et al.* (1969), les meilleures résistances mécaniques des argiles traitées à la chaux et au ciment sont obtenues avec la kaolinite suivie de l'illite.

Egalement, la forte présence de kaolinite au détriment de l'illite dans les sols étudiés témoigne du degré élevé d'altération chimique qu'ont subi les sédiments avant leur dépôt dans la région géotechnique R1 du sud de la Côte d'Ivoire.

En effet, lorsque l'hydrolyse des minéraux est importante, il se forme des minéraux secondaires tels que la kaolinite en fonction des conditions de drainage (BOULAY, 2003 ; ASSALE, 2013 ; ANO, 2019).

L'on entend par altération chimique, le lessivage progressif des minéraux sous l'action de l'hydrolyse (BOULAY, 2003). Ces conditions seraient, donc, nuisibles pour les ouvrages

routiers réalisés avec une forte présence d'illite dans le sud de la Côte d'Ivoire qui est plus soumis aux fortes intempéries (pluies, vents chaleurs...) car l'illite s'altérerait pour donner la kaolinite (ANO, 2019). Cette transformation pourrait occasionner des défauts dans les ouvrages routiers.

Les résultats de MILLOGO (2008) restent en conformité avec nos résultats. Pour ce dernier, la modification du comportement constaté dans les résultats des essais géotechniques sur les sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment, est généralement liée à l'action du mélange et de la teneur du mélange chaux et ciment notamment à 7 jours de cure dans l'eau. Pour lui, les résistances sont de l'ordre de 0,3 MPa avec le mélange de 1% de chaux et 3% de liant hydraulique.

Cependant, les résultats mécaniques en compression simple des sols traités aux mélanges chaux et ciment augmentent avec le temps de cure dans l'eau et dépassent 1 MPa entre 60 à 90 jours. Il fait montrer que cette augmentation est lente, mais, elle a lieu tout de même au fil du temps. Aussi, l'on montre que le comportement mécanique des schistes stabilisés évolue bien avec le temps mais les résistances atteintes restent assez faibles jusqu'au moment où se développent les hydrates de deuxième génération (CABANE, 2004). Selon les travaux de CABANE (2004) les résultats du mélange avec 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique sur les sables argileux auraient été de l'ordre de 1,2 MPa.

Cependant, l'on a obtenu des résultats qui vont dans le même sens que ceux des études antérieures de MESSOU (1980). Valeurs, bien au contraire, supérieures à celles mesurées sur les sols traités avec 1 % de chaux et 2,5% de ciment et celui traité avec 1% de chaux et 5 % de ciment. Pour ces types de sol, la résistance à la traction doit être revue à la hausse pour atteindre des valeurs exigées par la norme en construction routière.

Les études réalisées sur les sables argileux montrent que ceux-ci sont influencés par la présence du mélange chaux et ciment. L'emploi de la chaux est donc une méthode avérée pour faire changer le comportement des sols en améliorant à la fois la mise en œuvre in-situ et les forces portantes tout en augmentant la résistance et l'imperméabilité. Le changement survient aussi par la réaction de la chaux avec la surface argileuse dans un environnement de COT moins élevé ; la minéralogie de la surface argileuse est détruite lorsqu'elle réagit avec les ions calcium pour fabriquer des produits cimentaires tels : la tobermorite, selon MILLOGO (2008).

En effet, la chaux et le ciment étant des liants hydrauliques, ils utilisent une partie de l'eau de malaxage pour le déroulement des réactions d'hydratation ; ce qui fait que : plus la teneur en ciment est élevée, plus la demande en eau de malaxage est forte, d'où les teneurs en eau élevées au niveau des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou (GL6) et de Samo (S5).

Les mélanges chaux et ciment auront tendance à fixer l'eau contenue dans les matériaux composites, provoquant ainsi un appauvrissement du milieu en eau.

Dans les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment, il est créé un conflit par rapport à la fixation de l'eau de mélange entre l'association de chaux et ciment et les composantes du sable argileux.

Il en ressort que les valeurs des différents coefficients de correspondance R_{t360}/R_{t90} et E_{t360}/E_{t90} restent supérieures à 1. Cela traduirait que les valeurs des résistances à la traction et les modules de Young à la traction à 360 jours d'immersion dans l'eau, restent en hausse à celles des résistances à la traction et les modules de Young à la traction à 90 jours d'immersion dans l'eau.

R_{t360}/R_{t90} (B9 et GL6) < R_{t360}/R_{t90} (SG1 et S5). Les sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment ci-dessus sont ainsi différents des sols de SOULEY (2016) et LAVALLEE et *al.* (2018). Les sables argileux de Songon (SG1), pour le coefficient de correspondance, affichent la plus grande valeur (5) suivis des sables argileux de Samo (3), de Bingerville (2) et de Grand-Lahou (1,85). Ces différentes variations seraient liées à la fois à la présence du type de minéraux argileux contenu dans les différents sables argileux, mais aussi du temps de prise du mélange chaux et ciment.

En outre, E_{t360}/E_{t90} (S5 et GL6) < E_{t360}/E_{t90} (SG1 et B9). Ces valeurs vont de (2,6) pour les sables argileux traités au mélange chaux et ciment de Songon ; (1,6) pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville ; (1,2) pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Grand-Lahou et (1,1) pour les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Samo.

Pour cette étude, seuls les sables argileux traités aux mélange chaux et ciment de Samo et de Grand-Lahou semblent avoir une approche similaire avec les sols de SOULEY (2016) et LAVALLEE et *al.* (2018), si non, ils restent différents de ceux de Songon et de Bingerville.

Par contre, les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment de Bingerville (B9) et de Songon (SG1) présentent de meilleurs résultats. Ces derniers, sables argileux, présentent respectivement une faible proportion en illite (4 et 4,6 %) et en oxyde de fer (8,8 et 9,41 %) par rapport aux sols de Grand-Lahou et de Samo.

A 360 jours de cure dans l'eau, les résistances à la compression des sables argileux de Songon (SG1) et de Grand-Lahou (GL6) sont inférieures à celles des résistances à la compression à 90 jours de cure dans l'eau. Ces résultats sont en phases avec certains résultats de ABRIAK et *al.* (2010) et de OKYAY et *al.* (2012) qui traduisent ce fait par l'effet de stockage des échantillons, l'inégale répartition des contraintes induit par réaction chimique entre les particules des différents sols traités et du mélange chaux et ciment ou aux défauts très lents nés dans les matériaux liés aux impuretés qui pourraient perturber le traitement aux mélanges chaux et ciment.

Lorsqu'on mélange des liants à un sol, cela entraîne la formation de la tobermorite ou Silicate de Calcium Hydraté (CSH), de l'ettringite (CSH), de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la calcite (CaCO_3) et d'un oxyhydroxide de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ces produits formés participent à renforcer l'homogénéité de la microstructure et à augmenter les propriétés géotechniques et mécaniques des sols (MILLOGO, 2008).

Pour cet auteur, l'ajout des oxyhydroxides de fer à la concentration de fer inférieure à 10% existante dans les sables argileux contribuerait au renforcement du matériau contrairement aux sols avec une présence en oxyde de fer supérieure à 10%.

Il faut aussi noter que, ces différentes variations tiennent compte du type de minéraux argileux dans les sols et du temps de cure dans l'eau.

Lors du mélange chaux et ciment plus sol, auquel on ajoute de l'eau de gâchage, la chaux rentre en action, dans un premier temps, avec les argiles contenues dans les différents sols. Il s'en suit ; une réaction d'échange de cation avec une formation d'éléments grenus qui va rendre maniable l'ensemble ; c'est un effet immédiat qu'a la chaux dans le mélange.

Dans un second temps le mélange constitué par les éléments grenus et le ciment poursuit à moyen et long terme son action de durcissement et produit le Silicate de Calcium Hydraté (CSH) qui va accroître la résistance à la traction et le module de Young (E) à 360 jours sur le long terme des différents sables argileux de Grand-Lahou, Songon, Samo et Bingerville quand ils sont traités aux mélanges chaux et ciment.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif général de cette étude vise à identifier l'influence de l'ajout du mélange chaux et ciment sur les sables argileux, en vue de leur utilisation en construction routière.

Pour atteindre cet objectif général, les objectifs spécifiques qui en résultent étaient les suivants :

1°) identifier la matière première afin de connaître sa nature ;

2°) traiter les sables argileux aux mélanges chaux et ciment ;

3°) soumettre les sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment à des essais de résistance à la compression et à la traction, en vue de déterminer les modules de déformations et les coefficients de poisson et faire une application au dimensionnement de structures de chaussées.

Cette étude a été réalisée sur les sables argileux des localités du Sud de la Côte d'Ivoire, précisément dans la région géotechnique R1, notamment : Bingerville, Songon, Samo et Grand-Lahou afin de connaître leurs propriétés de bases.

Ces sables argileux ont donc été soumis à des essais d'identification et de caractérisation chimique et minéralogique, géotechniques et mécaniques à l'état naturel remanié puis après traitements aux mélanges de chaux et ciment.

IDENTIFICATION DE LA MATIERE PREMIERE ET APTITUDES AUX TRAITEMENTS

Du point de vue granulométrique, les sols de Bingerville, Songon, Samo et Grand-Lahou, malgré leur quantité élevée d'éléments grossiers (sable et grave) respectivement de 50 ; 56 ; 66 et 50%, renferment des fractions fines (limon et argiles) susceptibles de créer des liaisons solides entre les grains de chaque sol.

Les sols de Grand-Lahou, Bingerville et Songon ont plus d'argile avec des proportions respectives de 30 et 24% pour les deux derniers par rapport au sol de Samo qui est de 20%. Ces sols ont donc la plus grande capacité de rétention d'eau que ceux de Samo ; ce qui pourrait leur conférer une compacité moins élevée.

Ces sols appartiennent tous à la famille des sols grenus parce que leurs proportions en sable sont supérieures à 50% et ils sont de classe A car les plus grands diamètres des particules dans ces sols n'excèdent pas 50 mm et ces fractions influencent leur comportement mécanique.

Le sol de Samo conduirait à des produits plus résistants. Cette résistance décroît pour le sol de Grand-Lahou, Bingerville, puis Songon.

Les sols de Bingerville, Grand-Lahou et Songon appartiennent à la sous-classe A2 avec des fines (limon et argile) de 50% pour les deux premiers et 44% pour le dernier, supérieures à 35%, de nature argileuse de type très plastique à plastique. Quant aux sols de Samo, ils appartiennent à la sous-classe B6. Ces sols de sous-classe A2 et B6 ont des limites de plasticité allant de 12 à 25%, des densités sèches inférieures à 2 et des CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau inférieures à 30.

Ces dits sols de Bingerville, Grand-Lahou, Songon et Samo ne peuvent donc être utilisés à l'état naturel sans traitement ni en couche de fondation ni en couche de base de route. La présence très faible du Carbone Organique Total (COT) caractéristique la matière organique de même que le coefficient de gonflement volumique faible dans ces sols à l'état naturel indiquent leurs aptitudes à être traités aux liants hydrauliques pour une utilisation en assise de chaussée sous trafic de type T2.

L'Indice de Plasticité (IP) de ces sols sont au-dessus de 12%, ces dits sols sont sujets à un traitement approprié mixte de chaux et ciment auquel il faut associer une eau de gâchage dépourvue de matière organique.

CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE

Les analyses chimiques ont montré que les échantillons de sables argileux renferment majoritairement trois oxydes : oxyde de silice (SiO_2), oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et oxyde de fer (Fe_2O_3). Les sols de Bingerville, Songon et Samo possèdent à plus de 60% d'oxyde de silice (SiO_2) que les sols de Grand-Lahou qui n'en ont moins de 55%. Par contre, les sols de Samo et de Grand-Lahou ont des proportions élevées en oxyde de fer (Fe_2O_3) par rapport aux sols de Bingerville et Songon.

Tous les sables argileux étudiés présentent un rapport S/R supérieur à 2 indiquant que ces sols sont non latéritiques.

L'analyse des sables argileux étudiés par diffraction aux rayons X indique qu'ils sont majoritairement constitués de kaolinite à plus de 90% et d'illite à moins de 10%. L'illite est absente uniquement dans les sables argileux de Grand-Lahou ; ce dernier est également composé d'une faible quantité d'interstratifiés que sont la chlorite gonflante/smectite et la kaolinite/smectite. Du point de vue de la chimie et de la minéralogie, ces sols se prêtent aux traitements de chaux et ciment.

CARACTERISATION MECANIQUE, MODULES DE DEFORMATION ET COEFFICIENT DE POISSON DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT

Le traitement des sables argileux de Grand-Lahou, Songon, Samo et Bingerville a montré que l'ajout du mélange chaux et ciment à ces sables argileux dominés par une fraction argileuse pourrait accroître leurs caractérisations mécaniques.

Après différents mélanges de sol, chaux et ciment, les numéros de dosage associés aux mélanges de chaux et ciment ajoutés aux sables argileux pour les essais de compression et de traction sont : Grand-Lahou (GL6) qui donne un CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau de (79), Bingerville (B9) qui donne un CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau de (94), Songon (SG1) qui donne un CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau de (94) et Samo (S5) qui donne un CBR à 95% à l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau de (117) ; car ils ont les CBR les plus élevés à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau.

Cette étude a permis une augmentation des caractérisations mécaniques des sols de Grand-Lahou, Samo, Songon et Bingerville. Il s'agit, entre autres, des portances CBR après immersion à 95%, de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau des sables argileux de Songon SG1, Grand-Lahou GL6, Samo S5 et de Bingerville B9, qui passent respectivement de 21 à 94 ; 14 à 79 ; 20 à 117 et 13 à 94.

Les études de comportement mécanique telles que les tractions ont donné des résultats qui ont montré des augmentations au niveau de la résistance à la traction de 28 jours à 90 jours de cure dans l'eau qui passent respectivement de 0,14 à 0,15 MPa pour les sols de Songon, de 0,24 à 0,25 MPa pour les sols de Samo, de 0,25 à 0,4 MPa pour les sols de Bingerville et enfin, de 0,25 à 0,45 MPa pour les sols de Grand-Lahou.

Les résultats obtenus montrent que le mélange chaux et ciment confère à l'ensemble (sol et liants) une rupture élastique et améliore la résistance mécanique.

Les mélanges retenus sont : SG1 = 1% chaux + 2% ciment + 97% sable argileux ; GL6 = 2% Chaux + 6% ciment + 92% sableux argileux ; S5 = 2% chaux + 4% ciment + 94% sable argileux et B9 = 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux.

Les sables argileux, de Grand-Lahou, Samo, Songon et Bingerville, traités aux mélanges de chaux et ciment peuvent, donc, être utilisés pour faire des assises de route.

Les différents coefficients de correspondance R_T/R_C varient de 0,07 à 0,10 à 28 jours de cure dans l'eau, de 0,06 à 0,12 à 90 jours de cure dans l'eau et de 0,16 à 0,27 à 360 jours de cure dans l'eau. Ces différents sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment respectifs pourraient donc supporter une relative charge en compression et en traction avant de se rompre.

Le traitement de tous les sables argileux étudiés présente de bons résultats pour leur utilisation dans les ouvrages en techniques routières.

Au regard des coefficients de correspondance E_{T360}/E_{T90} , les sables argileux de Bingerville et spécialement ceux de Songon offrent les meilleurs résultats après traitement aux mélanges chaux et ciment.

Il ressort, après simulation itérative avec le logiciel ALIZE du LCPC, (1994) que les sols de Songon présentent les meilleures caractérisations pour le dimensionnement des chaussées.

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

A l'issue de cette investigation, cette étude pourrait être utilisée en vue de la participation à la promotion de la qualité dans la construction des ouvrages routiers.

L'emploi de cette technique de traitement des sables argileux aux mélanges chaux et ciment pourrait constituer une phase pilote dans la région géotechnique R1, du Sud de la Côte d'Ivoire et dans les pays tropicaux pour la construction des voies routières structurantes du réseau primaire et secondaire à faibles trafics de type T2.

L'introduction, plus accrue, de la chaux, une technique innovante en construction routière pour les pays au sud du Sahara, serait l'occasion souhaitée pour développer des projets routiers aux couches d'assises résistantes et durables et aussi un marché interne et externe d'industriel dans la fabrication et la vente de ce produit pour satisfaire aux besoins des secteurs utilisateurs. Ce développement pourrait s'accompagner de création de richesse aussi bien dans le commerce de fabrication de produits cimentaire que dans le BTP.

Nos données d'étude pourraient servir de base de données aux systèmes d'exploitation informatique ALIZE afin de concevoir et de dimensionner des assises de chaussée pour les pays tropicaux au Sud du Sahara.

Ces résultats pourraient intégrer les notes d'informations en technique routière et être prises en compte dans les recommandations des guides de dimensionnement de chaussées neuves et de renforcement à l'usage des techniciens du BTP et particulièrement ceux du secteur des terrassements.

La présente étude, intéresserait à l'élaboration d'un catalogue de dimensionnement des chaussées neuves des pays et contribuerait à la réduction de la distance de transport, du coût d'exploitation des véhicules affectés aux tâches de terrassement, le problème environnemental lié au soulèvement de la poussière par un traitement à la chaux et ciment in-situ des sols de mauvaise tenue afin de résoudre le problème écologique consécutif à la mise à décharge d'assez grande quantité de terre.

Les résultats probants de cette étude se présentent comme une bonne réponse aux problèmes de voirie en Côte d'Ivoire et ailleurs. Il serait, certes, onéreux dans leur mise en œuvre, mais beaucoup plus rentable en comparaison aux énormes dépenses engagées pour les renforcements ou le renouvellement des routes.

D'autres études géotechniques des matériaux nouveaux (amande de grain de palme, coqs de noix de coco, sève de d'hévéa sciures de bois...), façonnés et traités avec de la chaux e/ou du ciment sont donc envisagés afin de trouver des substitutions de bonne qualité et économiquement rentable aux traitements des sables argileux à la chaux et ciment. A cela, peut s'ajouter une orientation de la recherche en direction de l'utilisation du matériel et méthodes des plans d'expériences pour la détermination des paramètres de conception routière.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDO J. (2008). Traitement des sols en place aux liants hydrauliques, Journée Valorisation des sols médiocres, Paris, pp 1-52.

ABRIAK N.E., WANG D.X., ZANTAR R., XU W.Y. (2012). Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. *Environmental Technology*, vol. 33 n°1, pp 1-6.

AKA P. (1991). Sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : Essai de modélisation. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université d'Abidjan, n° 146, 320 p.

ALIZE-LCPC. (2016). Manuel d'utilisation. ALIZE-LCPC version 1,5., IFSTTA, 116 p.

AL-RAWAS A.A. (1998). The factors controlling the expansive nature of the soils and rock of northern Oman. *Engineering Geology*, 53 (3-4), pp 327-350.

AMOR B.K. (1995). Les conditions d'exploitation d'un produit montmorillonitique stabilisé à l'aide de ciment et mis en forme par extrusion, 168 p.

ANO N.F.D. (2019). Apport de la géochimie à la caractérisation des séquences de troisième ordre de l'intervalle Albo-Turonien dans le compartiment Est du bassin sédimentaire Ivoirien. Thèse de Doctorat unique Université Félix Houphouët Boigny Cocody, Côte d'Ivoire, 273 p.

ASSALE F.Y.P. (2013). Caractérisation sédimentologique, palynologique, géochimique et paléo environnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (est du bassin onshore de Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, 361 p.

ASSALE F.Y.P., MONDE S. & AKA K. (2012). Caractérisation litho-stratigraphique et pétro-sédimentologique des formations tertiaire-quaternaires de la région de Bingerville (Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE* 08 (2), pp 93-112.

ATTOH-OKINE N.O. (1990). Stabilizing effect of locally produced lime on selected lateritic soil. *J. Construction and building materials* 4, pp 86-91.

ATTOH-OKINE N.O. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels- revisited. *Construction and building materials*. Vol.9 (n°5), pp 283-287.

- AUTRET P. (1983).** Latérites et graveleux latéritiques. Etudes ISTED-LCPC, France, 38 p.
- AVWENAGHA E., ARONG T., OVERRE B., OKUNUWADJE S., & OSOKPOR J. (2014).** Classification and conception characteristics of lateritic off Warri Delta State. Nigeria. *Advances in applied Sciences Research*, pp 451-457.
- BAGARRE E. (1990).** Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED, 143 p.
- BASHA E.A., HASHIM R., MAHMUD HB., MUNTOHAR A.S. (2005),** Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and building Materials*. 19 (6), pp. 448-453.
- BELL F.G. (1996).** Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol*. 42, pp 223-237.
- BERNADET M., SINSON JP. (2010).** Analyse de l'évolution et de la répartition du trafic fret et la compétitivité modale. *Les cahiers scientifiques du transport, AFIT*, pp 55-75
- BOHI Z.P.B. (2008).** Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, 143 p.
- BOULAY S. (2003).** Enregistrements sédimentaires des variations de la mousson sud -est asiatique au cours des 2 derniers millions d'années. Approche sédimentologie, minéralogique et géochimique de sédiments profonds de mer de Chine du Sud. Thèse de Doctorat Université Pris XI, Orsay, 187 p.
- BOUDLAL O., DJEMAI M., HAMZA A., KHATTAOUI M. (2017).** Valorisation de nouveaux matériaux naturels et recyclés dans la construction routière en Algérie *Bull Géol. Environ* 76, pp 523-535.
- BOUTEFEU A. (1977).** Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 32, pp 23-42.
- BRABET I. (2012).** Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée Application à des projets de terrassement dans le département de l'Hérault. Mémoire de fin de cycle. Conservatoire national des arts et métiers. Paris, 127 p.

BRANDLE H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. Comptes rendus du Xème congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. Stockholm. Vol.3.

BUFALO M., BOUTONNIER L. (2018). Etude de l'impact du sens de compactage. Journée Nationale de géotechnique et de géologie de l'Ingénieur, Champ sur Marne, pp 1-8.

BULTEL F. (2001). Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements de tunnels. Thèse de Doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 246 p.

BURMISTER D.M. (1943). The theory of stresses and displacements in layered system and applications of the design of airport run ways In proceedings of the Highway research Board, 23, pp 126-146.

CABANE N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, 190 p.

CAILLIERE S., HENIN S., RAUTUREAU M. (1982). Minéralogie des argiles. Structures et propriétés physico-Chimiques. Masson, 184 p.

CANER L. (2011). Phyllosilicates des sols : de l'identification à la quantification. Habilitation à Diriger des Recherches, Univ. Poitiers, 143 p.

CASANOVA R., KNOPF D. (1969). Présence de chlorite gonflante dans une roche kimberlitique altérée de Côte d'Ivoire. Bulletin de Minéralogie, 92-5, pp 503-505.

CEBTP. (1980). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Rapport interne Ministère de la coopération de la république Française, 154 p.

CEBTP. (1984). Guide pratique de dimensionnement des routes dans les pays tropicaux ISBN 2, 157 p.

CIM-BETON. (2009). Conception et Dimensionnement, Voirie et aménagement urbain en béton. Collection Technique. T50, 125 p.

CODINORM. (2015). Catalogue des normes ivoiriennes. Centre d'Information sur les Normes et la Règlements. Ed., 82 p.

CRATERRE (1998). Gate bloc de terre comprimée : Eléments de base. Eschborn, Allemagne, 29 p.

DECARREAU A. (1990). Matériaux argileux : Structure, propriétés et applications. Société Française de Minéralogie et Cristallographie et du Groupe français des argiles, Paris. 586 p.

DELFAUT A. (1990). Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacienne de la région parisienne. Etude de laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp 13-22

DEMOLON A., LEROUX D. (1952). Guide pour l'étude expérimentale des sols : Gautier Villars, Paris, 251 p.

DIAMOND S., WHITE JI., and DOLCH WI. (1964). Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. Proc 12th National Conference on clay minerals. Pergamon Press, New York, N.Y, pp 359-379.

DIOP M. (2002). Conceptions de structures routières sur marnes et argiles gonflantes : Etude de cas : Bargny-Diamniadio. Mémoire d'Ingénieur. Université Cheikh Anta Diop Sénégal, 133 p.

DIVET L., RANDRIAMBOLOLONA R. (1998). Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H phase. Cem Concr Res. 28 (3), pp 357-363.

DJEDID T. (2020). Effet de la substitution du sable de rivière par du sable de carrière sur la durabilité des bétons à base de différents ciments algériens dans des environnement chimiques. Thèse de Doctorat Université Mohamed Khider-Biskra, 178 p.

DJOMO A. S. (2017). Valorisation des déchets biodégradables : Elaboration de produits (carreaux) à base de poudre et de tessons de bouteille en substitution du sable et stabilisés au ciment. Thèse de Doctorat. Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 276 p.

EADES J.L. (1962). Reactions of Ca(OH)_2 with clay minerals in soil stabilization. PhD thesis, University of Illinois, Urbana, 92 p.

EMERUWA E. (2000). Valorisation des argiles de Côte d'Ivoire : Essai de coloration des tuiles en microbéton pour l'argile rouge de Bonoua. *Africa Géosciences Revue*, n°2, pp 201-209.

ESPITALIE J., LAPORTE JL., MADEC M., MARQUIS F., LEPLAT P., PAULET J., BOUTEFEU A. (1977). Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 32, pp 23-42.

FOUCAULT A., RAOULT J.F. (1995). Dictionnaire de Géologie. Editions Dunod, 375 p.

FORTUNIER R. (1985). Comportement mécanique des matériaux. Cours de MMC. Ecole Nationale des Mines, Saint-Etienne, 83 p.

GTR. (2014). Guide des terrassements Routier. Classification des sols, Norme NF P11 300 et GTR, Fascicule, 12 p.

GTS. (2015). Guide Technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Franche-Comté en technique routière. Clister Eco-chantiers, 49 p.

GREHOA A.M. (2016). Latérite dans l'élaboration d'assises de route : analyse des performances des sols latéritiques de quelques localités de la Côte d'Ivoire (Anyama, Divo et Korhogo). Mémoire de Master, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 62 p.

GRIM R.E. (1953). Clay mineralogy. Book, McGraw-Hill, New York.

GUETTOUCHE A. (2016). Mécanique des sols I. Cours, Département de génie civile, Université Ferhat Abbas-Sétif 1, Algérie, 51 p.

GUEYE M. (2007). Réhabilitation et entretien de chaussées flexibles par le recyclage à chaud des matériaux bitumineux in-situ, Mémoire d'Ingénieur. Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès. Sénégal, 93 p.

HERRIER G., PUIATTI D., BONETTI S., FRY JJ., NERINCX N. (2015). Le traitement des sols à la chaux : Une technique innovante pour la construction des ouvrages hydrauliques en terre. 25^e congrès des grands barrages, Stavanger, Norvège, pp 554-576.

HUBERT F. (2008). Modélisation des diffractogrammes de minéraux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogique et pédologique. Thèse de Doctorat. Université de Poitiers, 223 p.

KATIA B. (2017). Valorisation d'un sol urbain dans le domaine routier : Mobilité des polluants dans les sols traités et/ou compactés. Thèse de Doctorat, Université Paris Est, 274 p.

KHATTAB SAA. (2002). Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 250 p.

KOUADIO K. C. (2014). Elaboration et caractérisation des blocs d'argile stabilisée au ciment (CIMARG) : Influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Thèse de Doctorat, Géomatériaux, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 189 p.

KOUAKOU C. H. (2005). Valorisation des argiles de Côte d'Ivoire : Etude de la stabilisation à froid de l'argile de Dabou avec un liant hydraulique (ciment portland), Thèse de Doctorat. Université de Cocody Abidjan, 184 p.

KOUBIKANA P.C.H. (2013). Développement d'un catalogue de conception des chaussées pour les pays Sub-Sahariens. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec, 171 p.

LAVALLEE E., BANCE Y. (2018). Valorisation de matériaux locaux améliorés au ciment (sols sableux et graveleux latéritiques) en assise de chaussées semi-rigides. Journées Africaines de la Géotechnique. 10^e édition, Abidjan, pp 6-28.

LBTP. (1977). Critères d'utilisation des graveleux latéritiques naturels en couche de base et couche de fondation. Rapport interne, 52 p.

LCPC. (1994). Guide technique-Conception et dimensionnement des structures de chaussée-, SETRA-LCPC, France.

LCPC. (2007). Guide-Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques-Guide technique, SETRA-LCPC, France,

LEROUX A., RIVIERE A. (1969). Traitement des sols argileux par la chaux. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, pp 59-95.

LOPEZ-LARA T., ZARAGOZA JB., LOPEZ C. (2004). Mineralogical characterization of stabilized soils. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol 9.

MAGNAN JP., BOURLON S. (2015). Coordination des Commissions de Normalisation géotechnique. Liste des normes du domaine géotechnique, IFSTTAR, Paris, 32 p.

MAGNAN JP. (2015). Description, identification et classification des sols. Bulletin du LCPC, 17 p.

MAHAMAT N. (2012). Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couche de chaussée au Burkina Faso : Cas des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso. Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement, Burkina Faso, 77 p.

MARTIAS C. (2011). Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie. Thèse de Doctorat, Université du Sud Toulon, 279 p.

MASSAMBA N. (2013). Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse de Doctorat. Université Paris-Est, 163 p.

MEDARD T., NOELIA C, Christine F. NELLY M. (2013). Technique de préparation des minéraux argileux en vue d'une analyse par diffraction des rayons X et introduction à l'interprétation des diagrammes. Ecoles des mines de Paris, France, 34 p.

MELLAL F., LAMRI B. (2010). Etude du comportement d'un remblai routier traité à la chaux. Université de Chlef. Algérie, pp 2-11

MENGUE E., HUSSEIN M., TARENT L., MEDJO R. E. (2015). Dimensionnement d'une assise de chaussée à base d'un sol latéritique traité au ciment à différents dosages. Rencontre universitaire de génie civil, Bayonne France, pp 1-9.

MESSOU M. (1980). Comportement mécanique d'une couche de base e graveleux latérique amélioré au ciment : cas des routes en Côte d'Ivoire. Rapport de recherche, LBTP, 197 p.

MILLOGO Y. (2008). Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuses du Burkina-Faso améliorés aux liants hydrauliques : application au génie Civil (Bâtiment et route). Thèse de Doctorat. Université de Ouagadougou, 157 p.

MOH ZC. (1965). Reactions of soil minerals with cement and chemicals. In Highway Research Record 86, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 39-61.

MOKHTARI M.A., HOSNI M.E.A. (2017). Qualité des terrassements dans l'exécution d'un projet routier. Mémoire de Master, Université Aboubakar Belkaid Tlemcen. Algérie, 84 p.

MOLARD J.P., CAMPS J.P. & LAQUERBE M. (1987). Etude de l'extrusion et la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales. *Materials and structures* 20, pp 44-50.

MOOR R.K. (1987). Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report. n°5, Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC., 58 p.

MOREL G. (1984). Sols fins traités en assises de chaussée. Etude en laboratoire du traitement à la chaux et au ciment des sols fins, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp 62-74.

MOREL J.C., PKLA A., WALKER P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and building materials*, n°21, pp 303-309.

NARASIMBA RAO S., RAJASEKARAN G. (1996). Reaction products formed in lime-stabilized marine clays. *J Geotech Eng.*, pp 329-336.

NJOPWOUO D., ORLEAC M. (1979). Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque tri-acide. *Cah ORSTOM, Série Pédol. Vol XVI I (n°4)*, pp 329-337.

NORTON J. (1986). Building with earth a handbook, IT, 65 p.

NF P 94-056 (1996). Sol : reconnaissance et essais – analyse granulométrique des sols- Méthodes par tamisage à sec après lavage. AFNOR, 15 p.

NF P 94-057 (1992). Sol : reconnaissance et essais – analyse granulométrique des sols- méthodes par sédimentation. AFNOR, 17 p.

NF P 94-078) (1997). Sols : reconnaissance et essais indice CBR après immersion – indice CBR immédiat - indice portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. AFNOR, 12 p.

NF P 94-093 (2014). Sols : reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor Normal – Essai Proctor modifié, AFNOR, 18 p.

NF P 94-102-2. (2001). Sol : reconnaissance et essais-Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux pour utilisation en couche de forme-Partie 2 : méthodologie des études de formulation en laboratoire AFNOR, 13 p.

NF P 98-232-2. (1992). Essais relatifs aux chaussées – Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques – Essais de traction directe sur graves et sables. AFNOR

NF P 98-232-1. (1991). Essais relatifs aux chaussées – Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 : Essais de compression simple sur grave.

NF P 98-114-3 (2009). Assise de chaussée – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux.

NF P 98-100 (2016). Assises de chaussées – Eaux pour assise de chaussée Classification exigences et essais.

NF P 94-051. (1993). Sols : Reconnaissance et Essais-Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau. AFNOR, 15 p.

NF EN 933-9. (2013). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 9 : qualification des fines – Essais au bleu de méthylène. AFNOR, 9 p.

NF EN 459-1. (2015). Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Part 1, pp 15-104.

NGUYEN N.T., CHIEN H.T., NGUYEN H.X., BORDAS S. P. A. et RABCZUKT (2015). Isogometric Analysis of Laminated Composite Plates Using the Higher-Order Shear deformation Theory, pp 451-469.

ODALELE, A., OLUSOLA, J., & EMMANUEL, T. (2012). Engineering properties of lateritic soils around Dall Quarry in Sango Area, Ilorin, Nigeria. Earth Science Research, Vol. 1, pp 1-9

ORMSBY WC, BOLZ LH. (1966). Microtexture and composition of reaction products in the system kaolin-lime-Water. J.Am. Ceram. SOC. Vol. 49 (N°7), pp 364-366.

OKYAY U.S., DIAS D. (2010). Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform, Engineering Geology, Volume 114, Issues 1-2, pp 34-44.

OSULA D.O.A. (1996). Lime modification of problem laterite. Eng. Geol. Vol.30, pp 141-154.

PAIGE-GREEN P. (1984). A laboratory investigation in the influence of carbonation on strength of lime-stabilized materials. Proc. of the 8 th Regional Conf. for Africa on Soil Mech and Found Engng. Harare, 4 p.

PETERS K.E., CASSA M.R. (1994). Applied Source Rock Geochemistry. In: The petroleum system from source to trap. MAGOON L.B & DOW W.G., eds, 1994. American Association of Petroleum Memoir 60. Alaska, U.SA, pp. 93-120.

PHILIPPONNAT G., HUBERT B. (1997). Fondations et ouvrages en terre, Editions Eyrolles, 545 p.

RONALD L., EPPS J.A, BARENBERG E.J., MITCHELL J.K, THOMPSON M.R. (1979). Soil stabilization in pavement structures-a user's manual. Fedral Highway Administration, Det. Of Transportation, USA, 168 p.

RUFF CG. HO C. (1966). Time-temperature-strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixtures. In Highway Research Record 139, HRB, National Research Council, Washington, DC, p 42-60.

SALLES F. (2006). Hydratation des argiles gonflantes : séquence d'hydratation multi-échelle et détermination des énergies microscopiques à partir des propriétés microscopiques. Thèse de Doctorat, Université Paris, 327 p.

SAMB F., MAKHALY B., MEISSA F., BERTHAND Y. (2013). Conférence International Eco-matériaux de construction, Ouagadougou, BURKINA FASO, pp 1-5.

SAUSSAYE L. (2012). Traitement des sols aux liants hydrauliques : Aspects géotechniques et physicochimiques des perturbations de la solidification. Matériaux. Thèse de Doctorat Université de Caen, 287 p.

SETRA/LCPC (1994). Guide technique. Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Rapport interne Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme, LCPC Paris, 260 p.

SCHON Ch. (1965). Classification géotechnique des sols basés sur la classification USCS. LCPC, Bulletin de liaison, 7 p.

SLOANE RL. (1965). Early reaction determination in two hydroxide-kaolinite system by electron microscopy and diffraction. In *Clays and Clay Minerals, Proceedings of the 13th Conference*, Pergamon Press, New York, N.Y., pp 331-339.

SOULEY I., (2016). Caractérisation et Valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 349 p.

STOCKER P.T. (1972). Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized Clayey Soils. Physical Aspect. Proc, 6th. Australian Road Research Board Conference. V6, pt. 5, pp 235-280.

TANKPINOU S.K.Y. (2016). Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique des sols fins en technique routière. Autre. Université de Bordeaux, Université d'Abomey Calavi (Bénin). 230 p.

TEMIMI M., BEN A.K., CAMPS JP., (1998). Making building products by extrusion and cement stabilization : limits of the process with montmorillonite clay, *Applied Clay Science*, Vol. 13, pp 245-253.

TIZIANO M., GIANLUCA P., VECCHIATTINI R. (2006). Mortier de chaux dolomitique avec adjonction de kaolin cuit : l'expérience génoise, *Archéo-Sciences* 30, pp. 67-79.

THOMPSON M R (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, vol.92, pp 67-92.

THOREZ J., (1976). Practical Identification of Clay Minerals. Ed. G. Lelotte Dison, 90 p.

TOURENQ B.J. (1989). Les sables et argiles du Bourbonnais (Massif Central, France) ; une formation fluvio-lacustre d'âge pliocène supérieur ; étude minéralogie, sédimentologie et stratigraphique. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 333 p.

TOCKOL I. (1993). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : Cas des routes non revêtues, Mémoire de Maîtrise, Université de Moncton. 225 p.

TOCKOL L., MASSIERA M., CHIASSON P., MAIGA M. (1994). Les graveleux latéritiques dans les pays de sahel : cas des routes non revêtues. 7e congrès International d'AIGI, Rotterdam, Holland.

TRAN N. T. (2009). Valorisation des sédiments marins et fluviaux en techniques routières. Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 205 p.

VIALLISSÉ-TERRISSE, (2000). Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne. France, 256 p.

VOINOVITCH A, DEBRAS-GUEDON J., LOUVIER J. (1962). L'analyse des silicates, Livre, Editeur Herman. Paris, 514 p.

WADAGNI A. P.K. (2019). Vérification de la structure de chaussée et suivi des travaux d'aménagement et de bitumage de la route des pêches et de ses bretelles d'accès à Cotonou au Bénin : phase 1. Mémoire de Master. Institut International d'Ingénierie (2IE) Burkina Faso, 146 p.

WALSH A. (1955). The application of atomic absorption spectra to chemical analysis, vol.7, pp 108-117.

WANG WH., HANDY RL. (1966). Role of MgO in soil-lime stabilization. In Special Report 90 : Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, HRB, National Research Council, Washington, DC, pp 1-18

WETSHONDO O.D., (2012). Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo). Thèse de Doctorat, Université. Liège, 336 p.

XP P 94-090-1 (1997). Sols : Sols : reconnaissance et essais - Essai œdométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. AFNOR, 23 p.

XP P 94-202 (1995). Sols : reconnaissance et essais-Prélèvement des sols et des roches-Méthodologie et procédure, AFNOR, 42 p.

XP P 94-011 (1999). Sols : reconnaissance et essais-Description-Identification-Dénomination des sols-Terminologie-éléments de classification, AFNOR, 22 p.

YOUCEF F., BOUSSAHA N. (2018). Effet des cycles gel-dégel et humidification-séchage sur la durabilité des traitements d'une marne argileuse de la région de Guelma. Mémoire de Master, Université de Guelma, Algérie. 123 p.

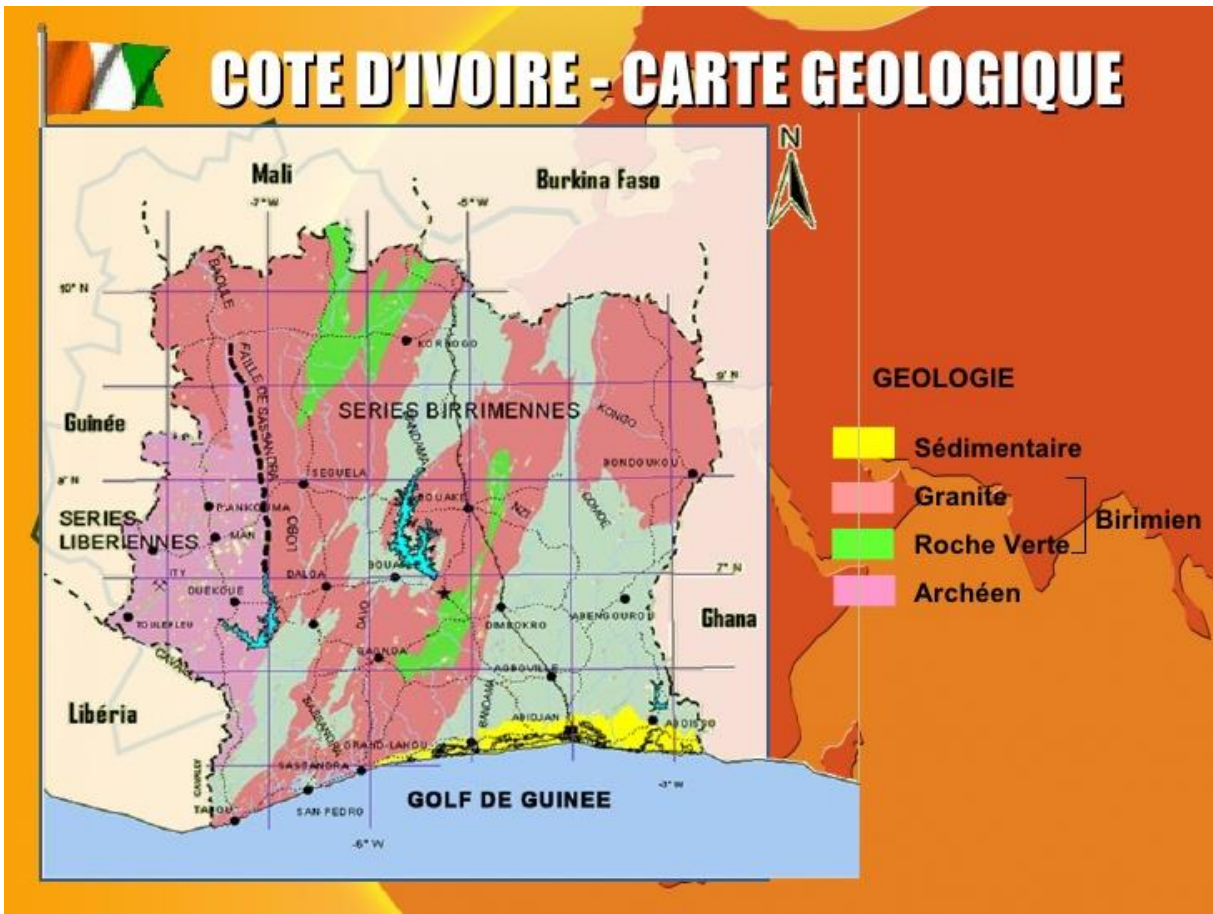
YU P., KIRKATRICK RJ., POE B., MCMILLAN PF., CONG X. (1999). Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) : near-mid and far infrared spectroscopy. J Am Ceram Soc. 82 (3), 7, pp 42-748.

ANNEXES

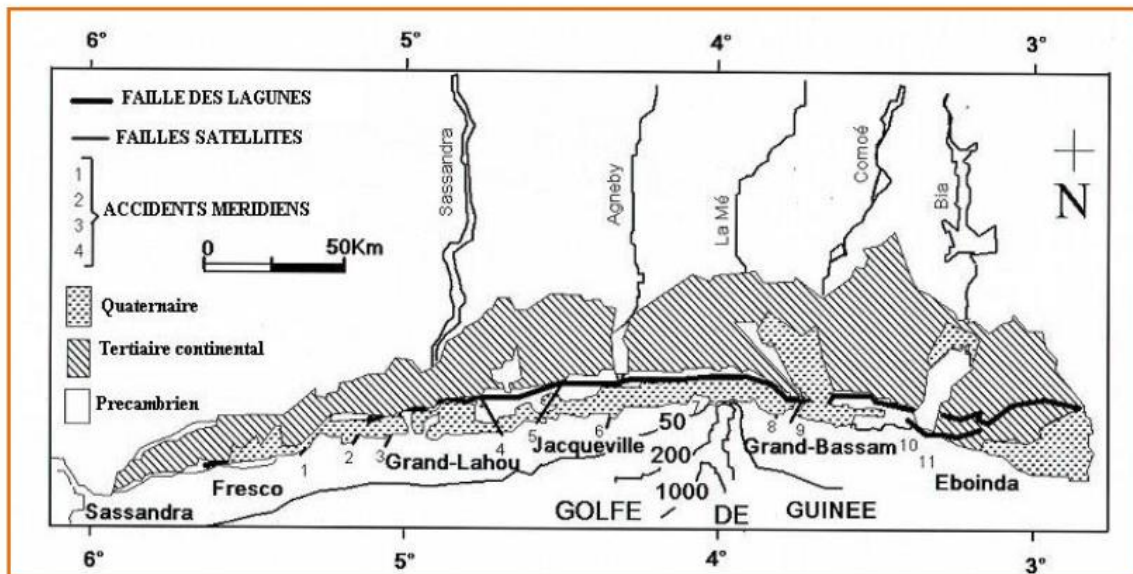
ANNEXES

- 1- 1. Carte géologique de Côte d'Ivoire.
2. Bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire
- 2- Evolution graphique des forces-déformations d'un matériau isotrope.
- 3- Différentes formulations des proportions sable argileux et mélanges chaux et ciment.
- 4- Courbes et résultats des densités sèches des sables argileux traités aux mélanges chaux et ciment en fonction de la teneur en eau optimale : mise en œuvre des formulations.
- 5- Evolution de la densité sèche des sols étudiés en fonction du numéro de formulation
- 6- Courbes et résultats des CBR à 95% de l'OPM des Sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.
- 7- Superposition à titre comparatif des courbes CBR à 95% de l'OPM en fonction des indices de dosage en chaux et ciment des localités d'étude.
- 8- Résultats des rapports R_t/R_{c_j} des différents sables argileux traités aux mélanges de chaux et ciment.
- 9- Classification des sols fins (GTR, 2014)
- 10- Appareillage DRX pour l'obtention des résultats sur les minéraux (source photographie : LABORATOIRE PETROCI, 2021)
- 11- Résultats des dimensionnements de structures (notice de calculs ALIZE-LCPC).

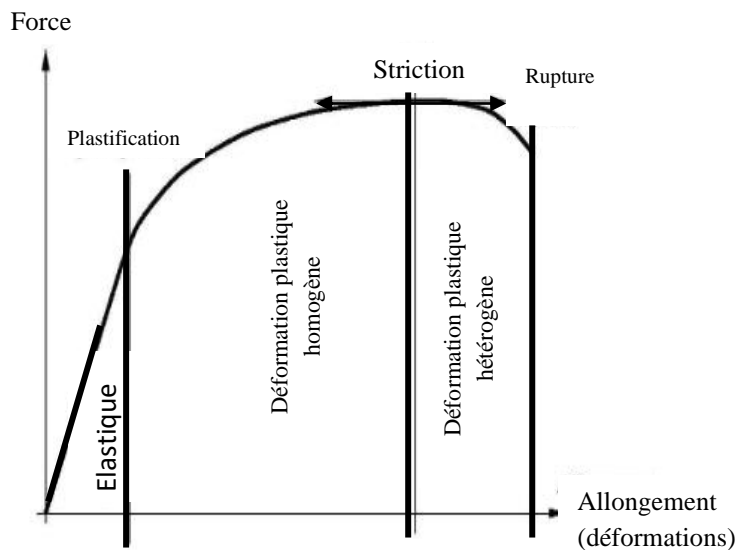
Annexe 1 : 1. CARTE GEOLOGIQUE DE COTE D'IVOIRE SODEMI, (2010)



2. Bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire (AKA, 1991 ; in ASSALE, 2013)



Annexe 2 : EVOLUTION GRAPHIQUES DES FORCES-DEFORMATIONS D'UN MATERIAU ISOTROPE (FORTUNIER, 1985)



Annexe 3 : DIFFERENTES FORMULATIONS DES PROPORTIONS SABLE ARGILEUX ET MELANGES CHAUX ET CIMENT

Définition des termes relatifs aux formulations de mélange (ML) chaux et ciment + sable

Site de Bingerville

Indice de formulation 1 : B1 = 1% chaux + 2% ciment + 97% sable argileux	Gamme 1 (G1) : % chaux constant=1 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 2 : B2 = 1% chaux + 4% ciment + 95% sable argileux	
Indice de formulation 3 : B3 = 1% chaux + 6% ciment + 93% sable argileux	
Indice de formulation 4 : B4 = 2% chaux + 2% ciment + 96% sable argileux	Gamme 2 (G2) : % chaux constant=2 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 5 : B5 = 2% chaux + 4% ciment + 94% sable argileux	
Indice de formulation 6 : B6 = 2% chaux + 6% ciment + 92% sable argileux	
Indice de formulation 7 : B7 = 3% chaux + 2% ciment + 95% sable argileux	Gamme 3 (G3) : % chaux constant=3 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 8 : B8 = 3% chaux + 4% ciment + 93% sable argileux	
Indice de formulation 9 : B9 = 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux	

Site de SONGON

Indice de formulation 1 SG1 = 1% chaux + 2% ciment +97% sable argileux	Gamme (G1) % chaux constant=1 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 2 SG2 = 1% chaux + 4% ciment + 95% sable argileux	
Indice de formulation 3 SG3 = 1% chaux + 6% ciment + 93% sable argileux	
Indice de formulation 4 SG4 = 2% chaux + 2% ciment + 96% sable argileux	Gamme 2 (G2) % chaux constant=2 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 5 SG5 = 2% chaux + 4% ciment + 94% sable argileux	
Indice de formulation 6 SG6 = 2% chaux + 6% ciment + 92% sable argileux	
Indice de formulation 7 SG7 = 3% chaux + 2% ciment + 95% sable argileux	Gamme 3 (G3) % chaux constant=3 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 8 SG8 = 3% chaux + 4% ciment + 93% sable argileux	
Indice de formulation 9 SG9 = 3% chaux + 6% ciment + 91% sable argileux	

Site de SAMO

Indice de formulation 1 S1 = 1% chaux + 2% ciment +97% sable argileux	Gamme 1 (G1) % chaux constant=1 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 2 S2 = 1% chaux + 4% ciment +95% sable argileux	
Indice de formulation 3 S3 = 1% chaux + 6% ciment +93% sable argileux	
Indice de formulation 4 S4 = 2% chaux + 2% ciment +96% sable argileux	Gamme 2 (G2) % chaux constant=2 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 5 S5 = 2% chaux + 4% ciment +94% sable argileux	
Indice de formulation 6 S6 = 2% chaux + 6% ciment +92% sable argileux	
Indice de formulation 7 S7 = 3% chaux + 2% ciment +95% sable argileux	Gamme 3 (G3) % chaux constant=3 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 8 S8 = 3% chaux + 4% ciment +93% sable argileux	
Indice de formulation 9 S9 = 3% chaux + 6% ciment +91% sable argileux	

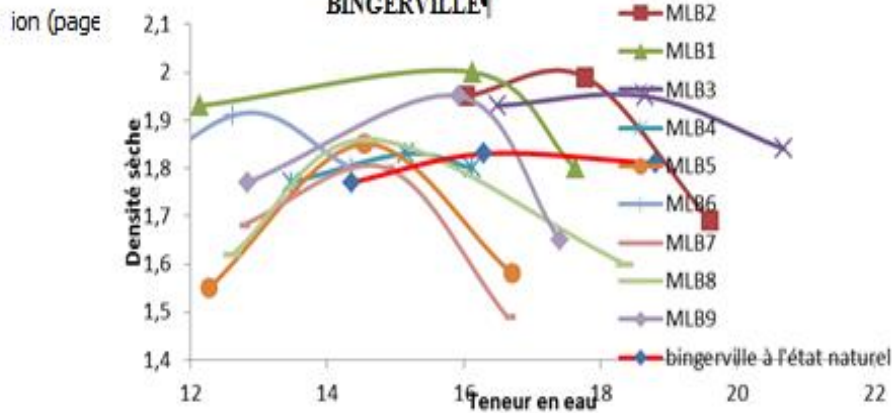
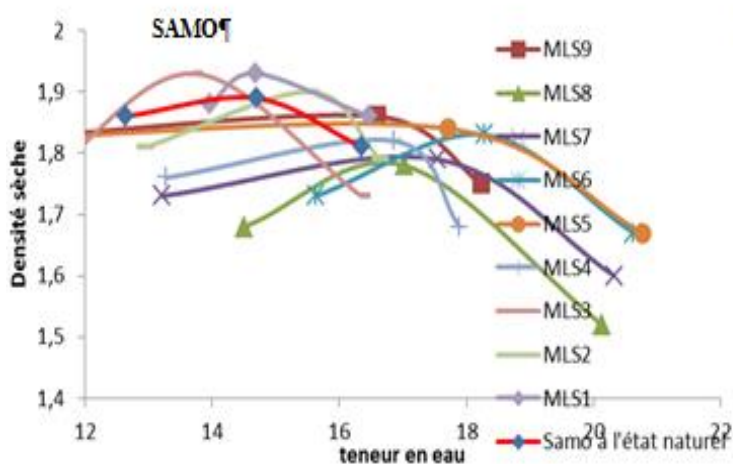
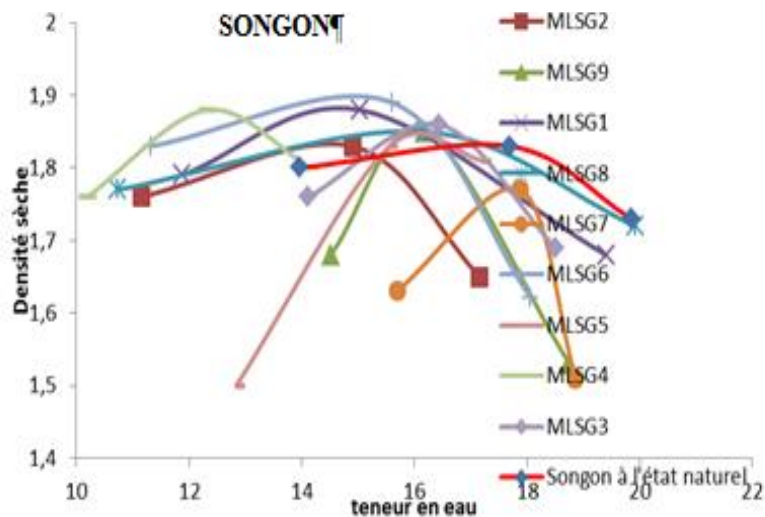
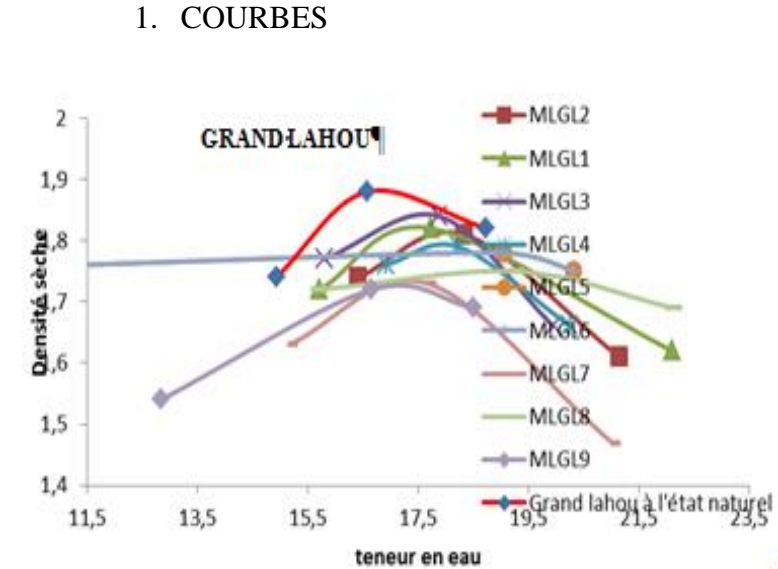
Site de GRAND-LAHOU

Indice de formulation 1 GL1 = 1% chaux + 2% ciment +97% sable argileux	Gamme 1 (G1) % chaux constant=1 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 2 GL2 = 1% chaux + 4% ciment +95% sable argileux	
Indice de formulation 3 GL3 = 1% chaux + 6% ciment +93% sable argileux	

Indice de formulation 4 GL4 = 2% chaux + 2% ciment +96% sable argileux	}	Gamme 2 (G2) % chaux constant=2 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 5 GL5 = 2% chaux + 4% ciment +94% sable argileux		
Indice de formulation 6 GL6 = 2% chaux + 6% ciment +92% sable argileux		
Indice de formulation 7 GL7 = 3% chaux + 2% ciment +95% sable argileux	}	Gamme 3 (G3) % chaux constant=3 % ciment variable=2, 4 et 6
Indice de formulation 8 GL8 = 3% chaux + 4% ciment +93% sable argileux		
Indice de formulation 9 GL9 = 3% chaux + 6% ciment +91% sable argileux		

Annexe 4 : COURBES ET RESULTATS DES DENSITES SECHES DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES CHAUX ET CIMENT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DE MOULAGE EN (%) DE LA TENEUR EN EAU OPTIMALE : MISE EN ŒUVRE DES FORMULATIONS.

1. COURBES



ion (page

2. RESULTATS

SAMO

Paramètres	Indices de formulation en dosage chaux et ciment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densités sèches	1,93	1,90	1,94	1,82	1,85	1,83	1,85	1,78	1,86
Teneur en eau optimal	14,60	14,40	16,20	12,40	16,00	15,00	17,80	16,00	16,00

BINGERVILLE

Paramètres	Indices de formulation en dosage chaux et ciment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densités sèches	2,03	1,99	1,94	1,83	1,85	1,92	1,85	1,86	1,95
Teneur en eau optimal	15,80	17,50	18,00	14,12	14,54	14,36	14,60	14,60	16,00

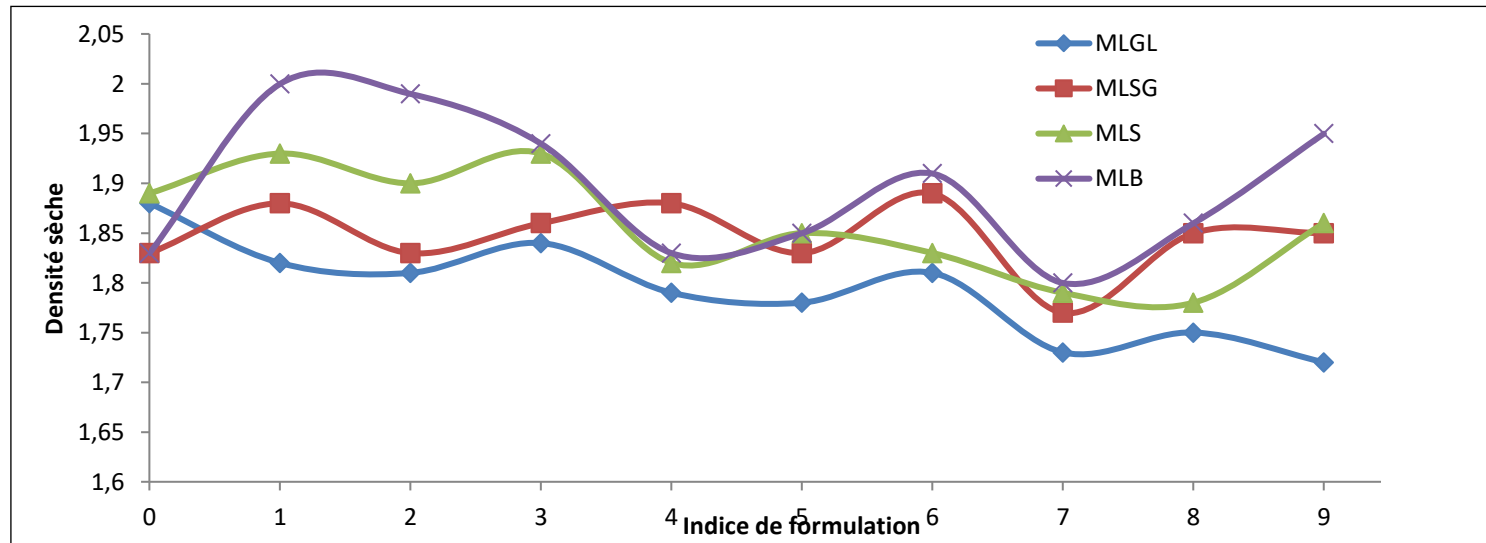
SONGON

Paramètres	Indices de formulation en dosage chaux et ciment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densités sèches	1,88	1,83	1,86	1,79	1,85	1,90	1,77	1,84	1,85
Teneur en eau optimal	15,04	14,60	16,40	12,32	16,00	15,61	17,60	16,18	16,00

GRAND-LAHOU

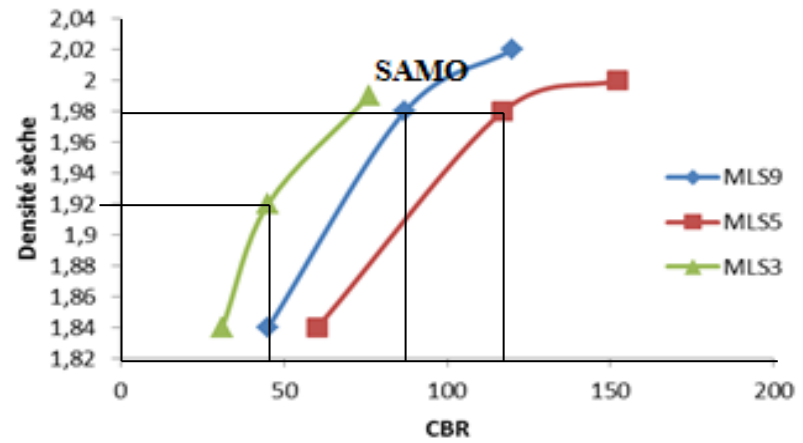
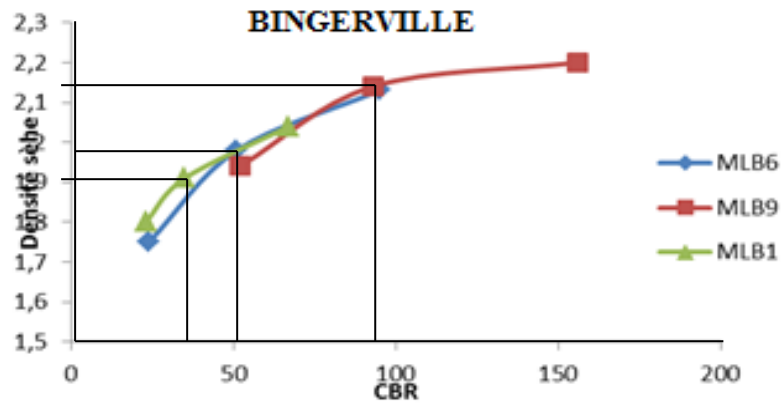
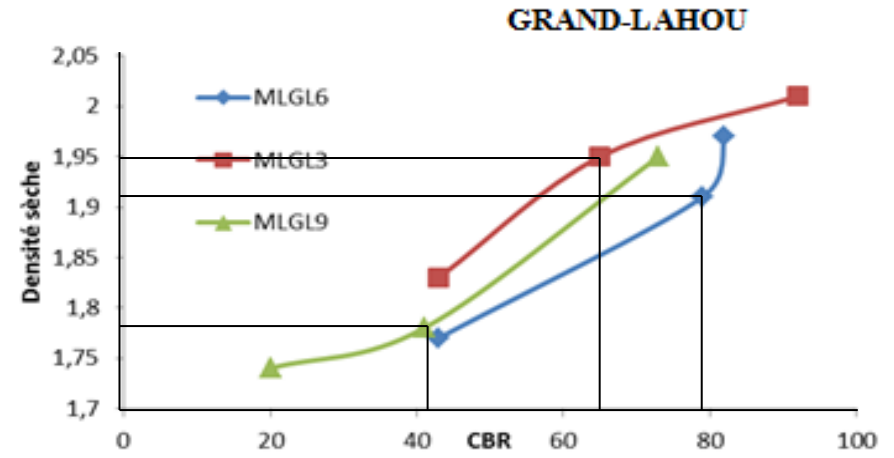
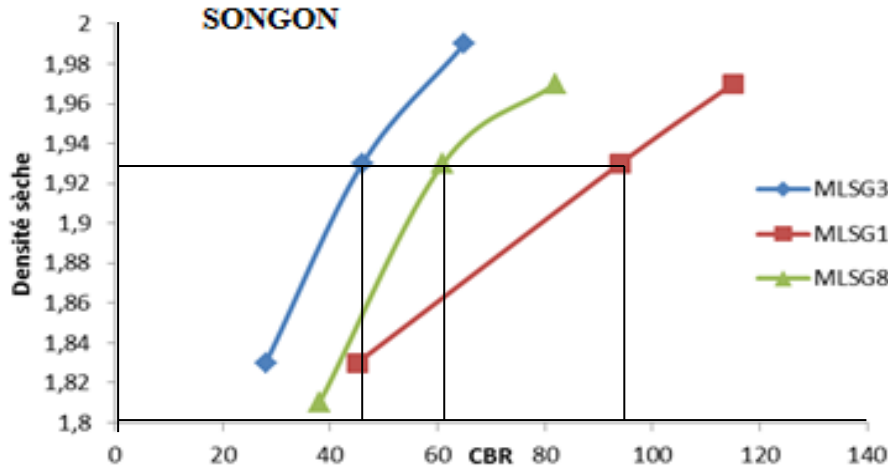
Paramètres	Indices de formulation en dosage chaux et ciment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densités sèches	1,82	1,82	1,86	1,81	1,78	1,88	1,74	1,73	1,75
Teneur en eau optimal	17,60	18,00	17,60	18,00	19,00	17,50	17,60	19,00	17,24

Annexe 5 : EVOLUTION DE LA DENSITÉ SÈCHE DES SOLS ÉTUDIÉS EN FONCTION DU NUMERO DE FORMULATION (mélanges chaux et ciment)



Annexe 6 : COURBES ET RESULTATS DES CBR A 95% DE L'OPM A 4 JOURS D'IMMERSION DANS L'EAU DES SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT

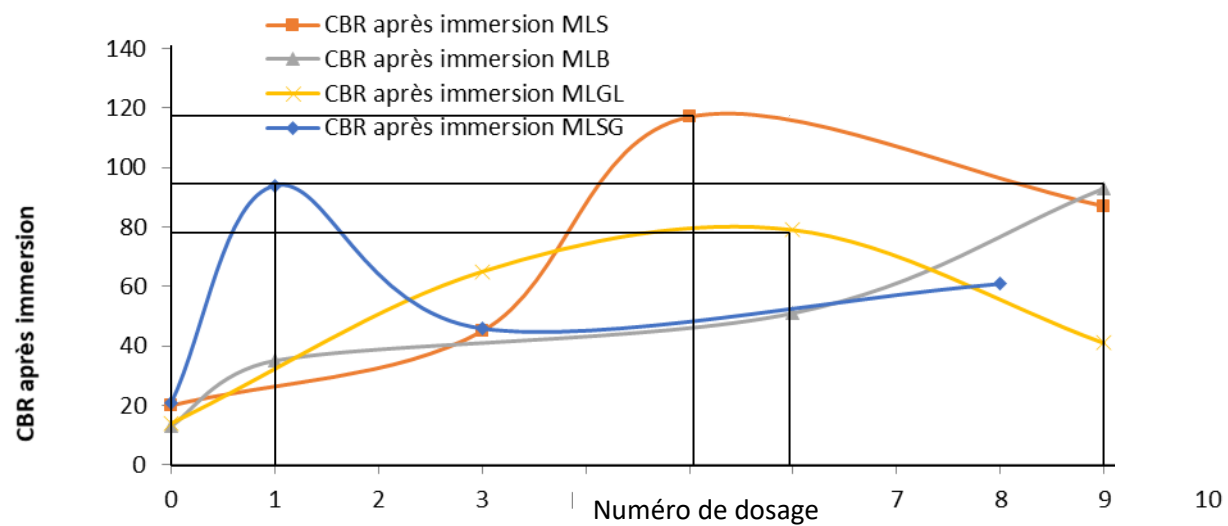
1. COURBES



2. RESULTATS

Sable argileux	SONGON			BINGERVILLE			SAMO			GRAND-LAHOU		
Indices de formulation en dosage chaux et ciment	1	6	9	1	6	9	3	5	9	3	6	9
Densités sèches	1,88	1,90	1,75	2,03	1,92	1,85	1,94	1,85	1,86	1,86	1,88	1,75
CBR à 95% OPM	94	61	41	35	51	94	45	117	87	65	79	41

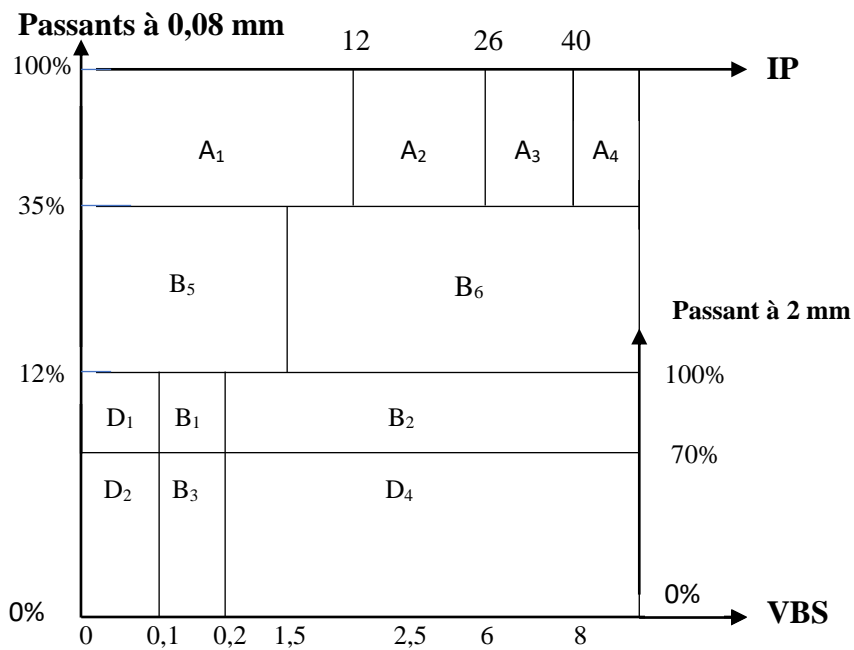
Annexe 7 : Superposition à titre comparatif des courbes CBR à 95% de l'OPM à 4 jours d'immersion dans l'eau en fonction du numéro de dosage en chaux et ciment des localités d'étude.



Annexe 8 : RAPPORTS RT_j/RC_j DES DIFFERENTS SABLES ARGILEUX TRAITES AUX MELANGES DE CHAUX ET CIMENT.

Rapport des contraintes à 28 et 90 jours de cure	Mélanges sable argileux avec chaux et ciment			
	SG1	S5	B9	GL6
Rt28J/Rc28J	0,11	0,14	0,11	0,8
Rt90J/Rc90J	0,04	0,11	0,14	0,10
RT360J/RC360J	0,27	0,18	0,18	0,22

Annexe 9 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS (GTR, 2014)



Annexe 10 : APPAREILLAGE DRX POUR L'OBTENTION DES RESULTATS SUR LES MINERAUX (Source photographie : LABORATOIRE PETROCI, 2021)

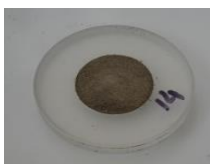
- Composition minéralogique des échantillons ;
- Quantification des minéraux argileux présents



Déblais de roches



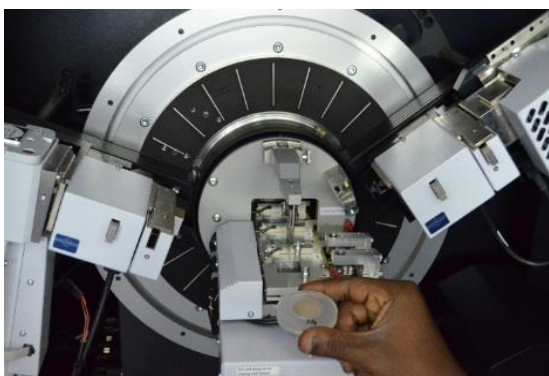
Carottes conventionnelles



Pastille de roche

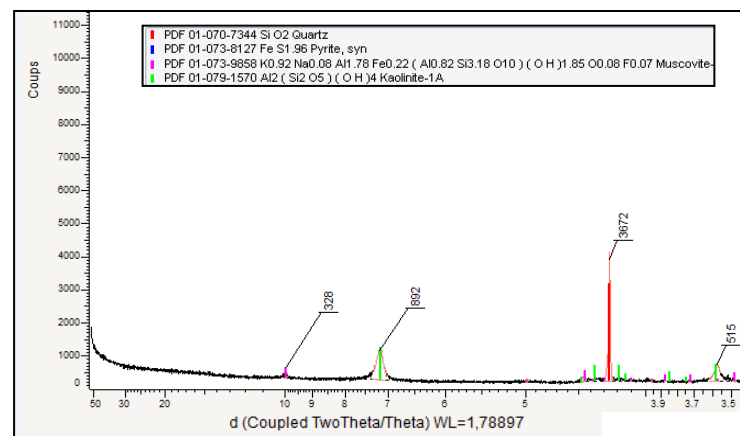


Lame d'argiles orientées

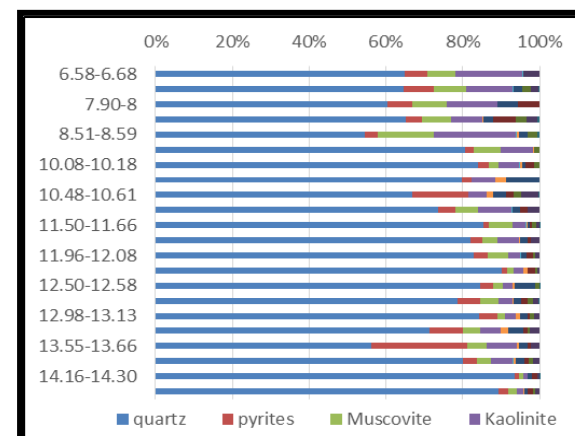
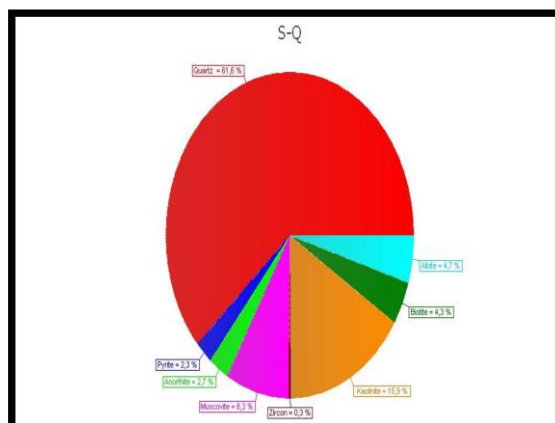


Analyses des roches au Diffractomètre de Rayons-X

RESULTATS



Diffractogrammes



Représentations graphiques des analyses semi-quantitatives au Diffractomètre de Rayons-X

**Annexe 11 : RESULTATS DES DIMENSIONNEMENTS DE STRUCTURES DE
CHAUSSEE (NOTICE DES CALCULS ALIZE-LCPC).**

- SITE DE GRAND-LAHOU

Structure 1 : 4SA + 18SC (4%) +20SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 4SA + 18SC (4%) +20SACC

- données Chargement :

- jumelage standard de 65 kN
- pression verticale : 0,6620 MPa
- rayon de contact : 0,1250 m
- entraxe jumelage : 0,3750 m

unités : m, MN et MPa ; déformations en µdéf ; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) :

tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- h= 0,040 m E= 3000,0 MPa nu= 0,350	surface (z=0.000) 0,000m	5,7	0,268	-75,6	0,658
----- h= 0,180 m E= 1500,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,040m) 0,040m	18,3	0,418	98,3	0,625
----- h= 0,200 m E= 300,0 MPa nu= 0,250	collé (z=0,220m) 0,220m	18,3	0,220	228,1	0,625
----- h= 0,200 m E= 300,0 MPa nu= 0,250	collé (z=0,220m) 0,220m	-213,8	-0,382	236,6	0,115
----- h= 0,200 m E= 300,0 MPa nu= 0,250	collé (z=0,420m) 0,420m	-213,8	-0,042	436,5	0,115
----- h infini E= 75,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,420m) 0,420m	-246,9	-0,079	257,6	0,042
----- h infini E= 75,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,420m) 0,420m	-246,9	-0,004	575,0	0,042

Déflexion maximale = 55,8 mm/100 (entre-jumelage)

Rayon de courbure = 245,0 m (entre-jumelage)

Structure 2 : 4SA + 20SB +20SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 4SA + 20SB +20SACC

- données Chargement :
 - jumelage standard de 65 kN
 - pression verticale : 0,6620 MPa
 - rayon de contact : 0,1250 m
 - entraxe jumelage : 0,3750 m
- unités : m, MN et MPa ; déformations en μ déf ; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) :
 tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et
 compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion
 maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- h= 0,040 m E= 3000,0 MPa nu= 0,350	surface (z=0.000) 0,000m	(z=0.000) -44,1	----- 0,109	----- -97,3	----- 0,658
----- h= 0,200 m E= 1000,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,040m) 0,040m	(z=0,040m) -16,4	----- 0,278	----- 139,3	----- 0,624
----- h= 0,200 m E= 300,0 MPa nu= 0,250	collé (z=0,240m) 0,240m	(z=0,240m) -223,8	----- -0,243	----- 266,8	----- 0,116
----- h= 0,200 m E= 300,0 MPa nu= 0,250	collé (z=0,440m) 0,440m	(z=0,440m) -252,1	----- -0,045	----- 443,2	----- 0,116
----- h infini E= 75,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,440m) 0,440m	(z=0,440m) -252,1	----- -0,081	----- 260,3	----- 0,042
			----- -0,005	----- 579,4	----- 0,042

Déflexion maximale = 56,4 mm/100 (entre-jumelage)
 Rayon de courbure = 197,8 m (entre-jumelage)

- SITE DE SONGON

Structure 1 : 3SA + 15SC (4%) +18SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées
 selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

- Signalement du calcul :
- données Structure : saisie écran
- titre de l'étude : 3SA + 15SC (4%) +18SACC
- données Chargement :
- jumelage standard de 65 kN
 - pression verticale : 0,6620 MPa
 - rayon de contact : 0,1250 m
 - entraxe jumelage : 0,3750 m
- unités : m, MN et MPa ; déformations en μ déf ; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) :
 tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et

compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- surface (z=0.000) -----					
h= 0,030 m0,000m	-5,4	0,262	-82,5		0,657
E= 3000,0 MPa					
nu= 0,350 0,030m	42,0	0,487	67,8		0,637
----- collé (z=0,030m) -----					
h= 0,150 m0,030m	42,0	0,248	200,2		0,637
E= 1500,0 MPa					
nu= 0,350 0,180m	-263,7	-0,471	299,1		0,154
----- collé (z=0,180m) -----					
h= 0,180 m0,180m	-263,7	-0,027	696,4		0,154
E= 234,0 MPa					
nu= 0,240 0,360m	-207,4	-0,036	369,9		0,073
----- collé (z=0,360m) -----					
h infini 0,360m	-207,4	-0,004	483,3		0,073
E= 150,0 MPa					
nu= 0,350					

Déflexion maximale = 42,4 mm/100 (entre-jumelage)

Rayon de courbure = 206,7 m (entre-jumelage)

Structure 2 : 3SA + 15SB +18SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 3SA + 15SB +18SACC

- données Chargement :

- jumelage standard de 65 kN
- pression verticale : 0,6620 MPa
- rayon de contact : 0,1250 m
- entraxe jumelage : 0,3750 m

unités : m, MN et MPa ; déformations en μ déf ; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) :

tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- surface (z=0.000) -----					
h= 0,030 m0,000m	-53,9	0,113	-101,4		0,657
E= 3000,0 MPa					
nu= 0,350 0,030m	14,9	0,449	100,6		0,640
----- collé (z=0,030m) -----					
h= 0,150 m0,030m	14,9	0,160	366,5		0,640
E= 1000,0 MPa					
nu= 0,350 0,180m	-304,8	-0,333	381,9		0,176

```

----- collé (z=0,180m) -----
h= 0,180 m 0,180m      -304,8      -0,032      796,7      0,176
E= 234,0 MPa
nu= 0,240  0,360m      -229,0      -0,040      397,4      0,078
----- collé (z=0,360m) -----
h infini  0,360m      -229,0      -0,005      519,7      0,078
E= 150,0 MPa
nu= 0,350

```

Déflexion maximale = 44,6 mm/100 (entre-jumelage)
Rayon de courbure = 162,8 m (entre-jumelage)

- SITE DE SAMO

Structure 1 : 4SA + 20SC (4%) +20SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :
données Structure : saisie écran
- titre de l'étude : 4SA + 20SC (4%) +20SACC
- données Chargement :
- jumelage standard de 65 kN
- pression verticale : 0,6620 MPa
- rayon de contact : 0,1250 m
- entraxe jumelage : 0,3750 m
unités : m, MN et MPa ; déformations en µdéf ; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) : tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- h= 0,040 m E= 3000,0 MPa nu= 0,350	surface (z=0.000) 0,000m	-6,2	0,212	-60,9	0,658
----- h= 0,200 m E= 1500,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,040m) 0,040m	9,0	0,378	108,2	0,626
----- h= 0,200 m E= 146,0 MPa nu= 0,260	collé (z=0,240m) 0,240m	-235,6	-0,428	238,2	0,089
----- h infini E= 150,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,440m) 0,440m	-133,6	-0,007	374,7	0,052
----- h infini E= 150,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,440m) 0,440m	-133,6	0,000	342,4	0,052

Déflexion maximale = 39,3 mm/100 (entre-jumelage)
Rayon de courbure = 251,5 m (entre-jumelage)

Structure 2 : 4SA + 18SB +20SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 4SA + 18SB +20SACC

- données Chargement :

- jumelage standard de 65 kN

- pression verticale : 0,6620 MPa

- rayon de contact : 0,1250 m

- entraxe jumelage : 0,3750 m

unités : m, MN et MPa ; déformations en $\mu\text{d}\acute{\text{e}}\text{f}$; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) : tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT	EpsilonZ horizontale	SigmaZ verticale	verticale
----- h= 0,040 m E= 3000,0 MPa nu= 0,350	surface (z=0.000) 0,000m	-50,2	0,110	-103,8	0,658
----- h= 0,180 m E= 1000,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,040m) 0,040m	-25,8	0,235	146,4	0,617
----- h= 0,200 m E= 146,0 MPa nu= 0,260	collé (z=0,220m) 0,220m	-312,2	-0,364	341,7	0,116
----- h infini E= 150,0 MPa nu= 0,350	collé (z=0,420m) 0,420m	-312,2	-0,015	823,6	0,116
		-167,1	-0,009	449,9	0,063
		-167,1	-0,002	412,3	0,063

Déflexion maximale = 44,7 mm/100 (entre-jumelage)

Rayon de courbure = 174,4 m (entre-jumelage)

- SITE DE BINGERVILLE

Structure 1 : 5SA + 20SC (4%) +25SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 5SA + 20SC (4%) +25SACC

- données Chargement :

- jumelage standard de 65 kN

- pression verticale : 0,6620 MPa

- rayon de contact : 0,1250 m

- entraxe jumelage : 0,3750 m
 unités : m, MN et MPa ; déformations en $\mu\text{d}\acute{\text{e}}\text{f}$; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) : tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

calcul	niveau horizontale	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
-----	surface (z=0.000)	-----	-----	-----	-----
h= 0,050 m E= 3000,0 MPa nu= 0,350	0,000m	-200,4	-0,300	-67,7	0,658
-----	collé (z=0,050m)	-----	-----	-----	-----
h= 0,200 m E= 330,0 MPa nu= 0,220	0,050m	-226,0	0,017	1483,5	0,514
-----	collé (z=0,250m)	-----	-----	-----	-----
h= 0,250 m E= 330,0 MPa nu= 0,220	0,250m	-178,7	-0,030	450,8	0,140
-----	collé (z=0,500m)	-----	-----	-----	-----
h infini E= 75,0 MPa nu= 0,350	0,500m	-243,5	-0,086	229,6	0,041
		-243,5	-0,004	572,9	0,041

Déflexion maximale = 63,6 mm/100 (entre-jumelage)
 Rayon de courbure = 101,2 m (entre-jumelage)

Structure 2 : 4SA + 18SB +25SACC

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure : saisie écran

- titre de l'étude : 4SA + 18SB +25SACC

- données Chargement :

- jumelage standard de 65 kN
- pression verticale : 0,6620 MPa
- rayon de contact : 0,1250 m
- entraxe jumelage : 0,3750 m

unités : m, MN et MPa ; déformations en $\mu\text{d}\acute{\text{e}}\text{f}$; déflexions en mm/100

Variante de calcul n° 1

Tableau 1 (synthèse) : tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

calcul	niveau horizontale	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
-----	surface (z=0.000)	-----	-----	-----	-----
h= 0,040 m E= 3000,0 MPa	0,000m	-48,5	0,097	-90,5	0,657

nu= 0,350	0,040m	-18,6	0,266	142,0	0,623
-----	collé	(z=0,040m)	-----	-----	-----
h= 0,180 m	0,040m	-18,6	0,139	400,9	0,623
E= 1000,0 MPa					
nu = 0,350	0,220m	-210,1	-0,216	275,1	0,143
-----	collé	(z=0,220m)	-----	-----	-----
h= 0,250 m	0,220m	-210,1	-0,044	476,4	0,143
E= 330,0 MPa					
nu = 0,220	0,470m	-230,9	-0,082	216,0	0,038
-----	collé	(z=0,470m)	-----	-----	-----
h infini	0,470m	-230,9	-0,004	537,1	0,038
E= 75,0 MPa					
Nu = 0,350					

Déflexion maximale = 54,7 mm/100 (entre-jumelage)
Rayon de courbure = 196,7 m (entre-jumelage)