

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS-LACS

ULPGL/GOMA



B.P. 368 Goma

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Génie Civil

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE
BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR UTILISATION
DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du

Diplôme de Bachelor en Sciences d'Ingénieur

Option : Génie Civil

Présenté par : USHINDI BUNGUKE David

Dirigé par : Dr. Ir. Ally ALINABIWE

Encadré par : Ir. BAHATI KAHASHI Yvan

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

ÉPIGRAPHE

« C'est avec sa propre argile qu'il faut façonner sa marmite. »

Proverbe Tunisien

DÉDICACE

À mes chers parents BUNGUKE Marc et Charlotte BATEYI

USHINDI BUNGUKE David

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail est le fruit d'un cheminement jalonné de rencontres et d'accompagnements précieux. À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous adressons ici notre reconnaissance la plus profonde.

Nous adressons tout d'abord nos remerciements à Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de courage, qui nous a soutenus tout au long de ces années d'études.

Nous remercions les autorités académiques de l'ULPGL/Goma, particulièrement la Faculté des Sciences et Technologies (FST), pour leur engagement à offrir une formation de qualité.

Nos remerciements vont également à Dr. Ir. Ally ALINABIWE, Directeur de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils éclairés, ainsi qu'à Ir. BAHATI KHASHI Yvan, notre encadreur, pour sa patience, son expertise et son précieux accompagnement.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur l'Abbé Justin WABO et à Monsieur l'Abbé Floribert MALEMO pour leur accompagnement spirituel, moral et financier.

Notre reconnaissance s'adresse aussi à nos frères et sœurs de la famille BUNGUKE pour leur présence constante, leurs encouragements et leur soutien indéfectible.

Nos remerciements s'adressent également à nos camarades de promotion pour l'esprit de collaboration et la camaraderie partagée au cours de ces années, ainsi qu'aux aînés en génie civil, Pascal CHOKOLA et Jonas KULIMUSHI, pour leurs conseils précieux au laboratoire.

Enfin, nous remercions l'équipe de l'Institut Français de Goma pour leur soutien constant.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire, nous exprimons notre gratitude sincère.

USHINDI BUNGUKE David

RÉSUMÉ

Ce travail de recherche a porté sur la caractérisation géotechnique des sols du gisement de Bugarula, situé sur l'île d'Idjwi dans la province du Sud-Kivu (RDC), en vue d'évaluer leur aptitude à être utilisés comme matériaux de construction routière. L'objectif principal était d'analyser leurs propriétés physiques et mécaniques et d'apprécier leur conformité aux exigences des normes routières en vigueur.

Pour atteindre cet objectif, des investigations de terrain ont été menées en saison sèche, avec le prélèvement de trois échantillons représentatifs (dénommés BUG1, BUG2 et BUG3) à trois points distincts du gisement espacés de 40 m, chaque échantillon ayant un poids d'environ 100 kg. Les échantillons ont ensuite été soumis à une série d'essais de laboratoire portant sur la détermination des paramètres d'état, l'identification des sols à travers l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg, ainsi que l'évaluation de la portance par l'essai CBR après immersion.

Les résultats obtenus montrent que les sols étudiés sont majoritairement fins, avec un pourcentage de fines supérieur à 35 %, conformément à la classification du Guide de Terrassement Routier. L'analyse du diagramme de Casagrande indique que BUG1 et BUG3 correspondent à des limons peu plastiques, tandis que BUG2 est une argile peu plastique à plasticité modérée. Les essais Proctor ont permis de déterminer des teneurs en eau optimales comprises entre 12,44 % et 17,9 %, pour des densités sèches maximales variant de 1,66 à 1,88 t/m³. Les valeurs de l'indice CBR après immersion, interprétées selon la classification de la Direction des Études Générales et Normalisation, révèlent une portance moyenne pour BUG1 ($6 < \text{CBR} < 12$), une portance faible pour BUG2 ($3 < \text{CBR} < 6$) et une portance très faible pour BUG3 ($\text{CBR} < 3$), associée à des gonflements variables. Ces valeurs, toutes inférieures aux seuils minimaux exigés par le Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) pour les différentes couches de chaussée, traduisent une portance insuffisante à l'état naturel.

Au regard de ces résultats et des recommandations du CEBTP, il apparaît qu'aucun des sols étudiés ne peut être utilisé directement en construction routière sans traitement préalable. Ainsi, la présente étude fournit une base scientifique fiable pour orienter de futures recherches portant sur l'amélioration, la stabilisation et la valorisation des sols de la carrière de Bugarula.

Mots clés : *Caractérisation, sol, matériau, construction, routier.*

ABSTRACT

This research focused on the geotechnical characterization of soils from the Bugarula deposit, located on Idjwi Island in South Kivu Province (DR Congo), with the aim of assessing their suitability for use as road construction materials. The main objective was to evaluate the physical and mechanical properties of these soils and to examine their compliance with current road engineering standards.

Field investigations were conducted during the dry season, during which three representative soil samples (BUG1, BUG2 and BUG3) were collected from three locations within the deposit, spaced 40 m apart. Each sample weighed approximately 100 kg. Laboratory testing included the determination of index properties, soil identification through particle size distribution and Atterberg limits, as well as bearing capacity assessment using the soaked California Bearing Ratio (CBR) test.

The results indicate that the studied soils are predominantly fine-grained, with fines contents exceeding 35%, in accordance with the GTR classification. Analysis using the Casagrande plasticity chart shows that BUG1 and BUG3 are low-plasticity silts, while BUG2 is a low- to moderately plastic clay. Proctor compaction tests revealed optimum moisture contents ranging from 12.44% to 17.9% and maximum dry densities between 1.66 and 1.88 t/m³. Soaked CBR values, interpreted according to the DEGN bearing capacity classification, indicate medium bearing capacity for BUG1 ($6 < \text{CBR} < 12$), low bearing capacity for BUG2 ($3 < \text{CBR} < 6$), and very low bearing capacity for BUG3 ($\text{CBR} < 3$), accompanied by variable swelling behavior. All values fall below the minimum requirements recommended by the CEBTP for pavement layers, indicating insufficient bearing capacity in the natural state.

Based on these findings and standard recommendations, none of the investigated soils can be directly used in road construction without prior treatment. This study provides a reliable scientific basis for future research on soil improvement, stabilization, and valorization of the Bugarula quarry.

Key words: *Characterization, soil, materials construction, road.*

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AFNOR	: Association Française de Normalisation
AG	: Analyse Granulométrique
AASHTO	: American Association of State Highways Officials
B	: Base
BUG	: Bugarula
CBR	: California Bearing Ratio (Indice portant Californien)
CEBTP	: Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
Cm	: Centimètre
Cu	: Coefficient d'uniformité
Cz	: Coefficient de courbure
DEGN	: Direction des Etudes Générales et Normalisation
DVDA	: Routes d'intérêt local ou de desserte agricole
FSTA	: Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
G.T.R	: Guide de Terrassement Routier
G.N.T	: Graves Non Traitées
GB	: Couche de base
g	: Gramme
H	: haut
I_c	: Indice de consistance
I_p	: Indice de plasticité
I_L	: Indice de liquidité
IPI	: L'Indice CBR immédiat ou l'Indice CBR d'immersion.
KN	: Kilo Newton
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M	: Masse
MTLH	: Les matériaux traités aux liants hydrauliques
mh	: La masse humide du sol
md	: La masse sèche du sol
mm	: Millimètre
m³	: Mètre cube

ND	: Non défini
NF	: Norme Française
NP	: Non plastique
OR	: Office des routes
RDC	: République Démocratique du Congo
RN	: Route nationale
RPP	: Routes provinciales prioritaires
RPS	: Routes provinciales secondaires
T	: La tare
TH	: Très haut
t	: Tonne
USCS	: Unified Soil Classification System
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs
W_L	: Limite de liquidité
W_p	: limite de plasticité
W_{opt}	: Teneur en eau optimale
W	: Teneur en eau
W_w	: Le poids d'eau contenu dans le matériau
W_s	: Le poids sec du matériau
μm	: Micromètre
°	: Degré
%	: Pourcent
ρ	: Masse volumique
ρ_d	: Masse volumique sèche
ρ_s	: Masse volumique des grains solides
ρ_{dmax}	: Densité sèche maximale

LISTE DE FIGURES

<i>Figure I-1 : sol calcaire</i>	5
<i>Figure I-2 : Sol humifère</i>	5
<i>Figure I-3 : Sol limoneux</i>	5
<i>Figure I-4 :Sol sableux ou sablonneux</i>	6
<i>Figure I-5 : Sol argileux</i>	6
<i>Figure I-6 : Classification des sols fins: Diagramme de plasticité [10].</i>	11
<i>Figure I-7 Diagramme de classification GTR de sol [4].</i>	12
<i>Figure I-8 : Structure d'une chaussée [7].</i>	23
<i>Figure II-1 : la vue panoramique du gisement de Bugarula [17].</i>	25
<i>Figure II-2 : Echantillons des sols prélevés dans le gisement de Bugarula</i>	27
<i>Figure II-3 : Balance de précision et la tare</i>	28
<i>Figure II-4 : Etuve de chauffage</i>	28
<i>Figure-II-5 : Courbe de distribution massique des grains [9].</i>	33
<i>Figure-II-6 : Courbe de l'analyse granulométrique [9]</i>	35
<i>Figur-II-7 : Graphique de l'analyse granulométrique [9]</i>	36
<i>Figure-II-8 : Exemple de représentation de $w = f(\log N)$. Détermination de WL [9]</i>	39
<i>Figure II-9 : Diagramme Proctor simple [9]</i>	43
<i>Figure III-1 : Analyse Granulométrique BUG1</i>	54
<i>Figure III-2 Analyse Granulométrique BUG2</i>	55
<i>Figure III-3 Analyse Granulométrique BUG3</i>	56
<i>Figure III-4 Limite d'Atterberg BUG1</i>	57
<i>Figure III-5 Limites d'Atterberg BUG2</i>	57
<i>Figure III-6 Limite d'Atterberg BUG3</i>	58
<i>Figure III-7 Diagramme de Casagrande des sols de Bugarula</i>	59
<i>Figure III-8 Proctor Modifié BUG1</i>	60
<i>Figure III-9 : Proctor Modifié BUG2</i>	61
<i>Figure III-10 : Proctor Modifié BUG3</i>	61
<i>Figure III-11 : Fuseau granulométrique des sols de Bugarula en couche de fondation</i>	65
<i>Figure III-12 : Fuseau granulométrique des sols de Bugarula en couche de base</i>	65
<i>Figure III-13 : Limites d'Atterberg des sols de Bugarula avec les seuils CEBTP</i>	66

Figure III-14 : CBR des sols de Bugarula avec les seuils CEBTP 67

LISTE DE TABLEAUX

<i>Tableau I-1 Classement des matériaux suivant leur diamètre [7].....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I-2 : classifications des limites d'Atterberg en fonction de leurs états correspondants [8].....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I-3 Types de sol en fonction de l'Ip [4]</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I-4 Classification de Sanglerat (gonflement libre en fonction d'IP) [4]</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I-5 : Echelle de classification des sols suivant les valeurs d'Ic [4].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I-6 Etat de consistance de sol en fonction de l'I_l [10]</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I-7 Classification de Dakstana (Potentiel de gonflement en fonction de WL [4].....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I-8 Tableau simplifié de la classification des sols GTR [9].....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau I-9 : Réseau routier congolais [15]</i>	<i>18</i>
<i>Tableau II-1 : Indice de consistance [4].....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau II-2 Pourcentage de CBR et sa classe de portance [8]</i>	<i>50</i>
<i>Tableau II-3 : CBR selon l'utilisation des sols</i>	<i>50</i>
<i>Tableau III-1: Valeurs obtenues sur les différents paramètres d'état des sols de Bugarula</i>	<i>53</i>
<i>Tableau III-2 : Limites d'Atterberg des sols de Bugarula.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau III-3 : Résultats du Proctor Modifié des sols de Bugarula</i>	<i>62</i>
<i>Tableau III-4 : L'indice de Portance du sol BUG1.</i>	<i>62</i>
<i>Tableau III-5 : L'indice de Portance du sol BUG2.</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III-6 : L'indice de Portance du sol BUG3.</i>	<i>63</i>
<i>Tableau III-7 : Gonflement linéaire (Post-CBR) des sols du gisement de Bugarula à Idjwi</i>	<i>64</i>

TABLE DE MATIÈRES

ÉPIGRAPHE	i
DÉDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	vi
LISTE DE FIGURES	viii
LISTE DE TABLEAUX	x
TABLE DE MATIÈRES.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre I. GÉNÉRALITÉS.....	4
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 DEFINITIONS ET GENERALITES DES SOLS [4]	4
I.2.1 Grains	4
I.2.2 Pores	4
I.3 DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS [5]	5
I.4 L'ANALYSE ET IDENTIFICATION DES SOLS [6].....	6
I.4.1 Essais sur les sols fins	7
I.4.2 Classification des sols [8].....	10
I.5 INFLUENCE DE L'EAU SUR LES PROPRIETES DES SOLS FINS [9].....	13
I.6 PROBLEMES LIES A L'UTILISATION DES SOLS ARGILEUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE	14
I.6.1 Phénomènes de gonflement et retrait	14
I.7 QUELQUES CAS DE PATHOLOGIE.....	16
I.7.1 Cas de bâtiments.....	16

I.7.2	Cas des chaussées	16
I.8	NOTION SUR LES ROUTES	17
I.8.1	Définition	17
I.8.2	Importance d'une route	17
I.8.3	Réseau routier congolais	18
I.8.4	Notion générale sur les chaussées [16]	19
I.8.5	Importance de la géotechnique routière [13].....	23
I.9	CONCLUSION PARTIELLE	24
Chapitre II. : MÉTHODOLOGIE.....		25
II.1	INTRODUCTION	25
II.2	PRÉSENTATION DU MILIEU D'ETUDE [1] [2]	25
II.2.1	Situation géographique.....	26
II.2.2	Relief et topographie locale.....	26
II.2.3	Climat	26
II.2.4	Végétation et occupation du sol	26
II.2.5	Contexte géologique et enjeux géotechniques	26
II.3	ECHANTILLONNAGE	27
II.4	ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS	28
II.4.1	Teneur en eau naturelle du sol [19].....	28
II.4.2	Masses volumiques	29
II.4.2.1.	Masse volumique apparente	30
II.4.2.2.	Masse volumique absolue.....	30
II.4.3	Analyse granulométrique	32
II.4.4	Les limites d'Atterberg.....	37
II.4.4.1.	Limite de liquidité	37
II.4.4.2.	Limite de plasticité	39
II.4.4.3.	Indices déductibles des limites d'Atterberg.....	40
II.5	ESSAIS DE CARACTÉRISATION MECANIQUE DES SOLS [23]	41
II.5.1	Essai Proctor [10]	42
II.5.2	Essai CBR (California Bearing Ratio)	44
II.5.3	Analyse du gonflement linéaire (Post-CBR) [26] [25]	50
II.6	CONCLUSION PARTIELLE	51

Chapitre III. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS

53

III.1	INTRODUCTION	53
III.2	CARACTÉRISTIQUES DE SOLS DE BUGARULA À L'ÉTAT NATUREL ...	53
III.2.1	Paramètres d'état	53
III.2.2	Analyse Granulométrique.....	54
III.2.3	Limites d'Atterberg	56
III.2.4	Classification des sols de Bugarula selon le diagramme de Casagrande	59
III.3	CARATÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS.....	60
III.3.1	Proctor Modifié	60
III.3.2	CBR California Bearing Ratio (Indice portant Californien)	62
III.3.3	Gonflement linéaire (post-CBR)	63
III.4	CONFORMITÉ DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA AUX CONSTRUCTIONS ROUTIÈRES SELON LE CEBTP.....	64
III.4.1	Conformité de la granulométrie des sols au regard du fuseau CEBTP	64
III.4.2	Limite d'Atterberg avec les seuils CEBTP	66
III.4.3	CBR des sols avec les seuils CEBTP	67
III.5	CONCLUSION PARTIELLE	67
	CONCLUSION GÉNÉRALE	69
	BIBLIOGRAPHIE	71
	ANNEXES	74

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'amélioration des infrastructures routières demeure un enjeu majeur pour le développement économique et social de nombreuses régions de la République Démocratique du Congo. Sur l'île d'Idjwi, située dans la province du Sud-Kivu, cet enjeu est encore plus marqué en raison de son isolement géographique et de la faible qualité de ses voies de communication. Les déplacements y sont souvent difficiles, et l'absence de matériaux routiers fiables limite la mise en œuvre de projets durables [1].

Dans ce contexte, la valorisation des gisements locaux de matériaux, notamment ceux issus des gisements de l'île, apparaît comme une piste essentielle pour réduire les coûts liés à l'importation de granulats et pour soutenir la construction de routes adaptées aux conditions environnementales locales. Parmi ces gisements, le gisement de Bugarula à Idjwi Nord constitue une source importante de matériaux, mais aucune étude scientifique n'a encore été menée pour en caractériser les sols [2]. Cette absence de données empêche de déterminer avec précision leurs propriétés physiques et mécaniques, ainsi que leur aptitude réelle à être utilisés dans la construction routière.

Malgré l'existence de gisements exploités de manière artisanale à Idjwi, les matériaux locaux restent insuffisamment caractérisés sur le plan géotechnique. Cette méconnaissance conduit souvent à des choix constructifs empirique, parfois inadéquats, qui se traduisent par une dégradation rapide des routes.

Le gisement de Bugarula, fréquemment sollicitée dans plusieurs chantiers locaux, ne fait pas exception : aucune étude scientifique approfondie n'a jusqu'ici permis de définir clairement les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux qu'elle fournit. Or, l'absence de telles données pose un double problème :

- Il est difficile d'évaluer si ces sols répondent aux exigences des normes routières,
- et il devient compliqué de proposer des solutions de mise en œuvre adaptées aux réalités du terrain.

Ainsi, la question centrale est de savoir si les matériaux du gisement de Bugarula possèdent les caractéristiques nécessaires pour être utilisés de manière fiable dans la construction routière, et à quelles conditions leur utilisation serait techniquement appropriée.

Pour bien mener cette étude, il est important de répondre à certaines questions de recherche dont :

- Quelles sont les caractéristiques géotechniques (physiques, mécaniques) des sols prélevés dans le gisement de de Bugarula ?
- Dans quelle mesure ces caractéristiques répondent-elles aux exigences et recommandations des normes routières ?
- Les matériaux du gisement de Bugarula peuvent-ils être utilisés tels quels, ou nécessitent-ils un traitement ou un tri pour améliorer leurs performances ?

Pour répondre à ces questions de recherche d'une manière anticipative, les hypothèses sont telles que :

- Les sols du gisement de Bugarula présenteraient des propriétés variables qui influencent leur aptitude à être utilisés en construction routière.
- Certains de ces matériaux pourraient répondre aux critères techniques requis pour les couches routières, après un contrôle granulométrique ou un ajustement de l'humidité.
- Une caractérisation complète permettrait d'orienter les décisions techniques liées à leur emploi dans des projets routiers à Idjwi.

Le choix de ce sujet se justifie par la nécessité de combler le vide scientifique existant et de fournir une base technique de données fiables sur les matériaux naturels disponibles à Idjwi, afin de réduire les coûts de construction et d'encourager une approche durable des infrastructures. Le présent travail constitue une contribution originale, car il s'agit de la première étude scientifique complète portant sur les sols du gisement de Bugarula. L'apport principal de ce travail réside donc dans la caractérisation détaillée et intégrée des propriétés géotechniques des sols de ce gisement. Ce travail trouve également son importance dans la volonté de promouvoir une ingénierie adaptée aux contraintes économiques et géographiques de l'île.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'aptitude des sols du gisement de Bugarula à être utilisés comme matériaux de construction routière.

Et les objectifs spécifiques sont tels que :

- Décrire les caractéristiques physiques et granulométriques des sols de Bugarula.
- Analyser leurs propriétés mécaniques à travers des essais adaptés (CBR, Proctor, limites d'Atterberg, etc.).
- Comparer les résultats aux exigences techniques des normes routières.
- Identifier les conditions d'utilisation appropriées de ces matériaux dans une structure routière.

- Proposer, si nécessaire, des recommandations pour leur amélioration ou leur emploi optimal sur le terrain.

Pour atteindre les objectifs fixés, trois approches méthodologiques ont été mobilisées :

- La méthode documentaire, qui a consisté à collecter et analyser des données scientifiques relatives aux notions de base sur les sols, méthodes de caractérisation géotechnique ainsi qu'aux normes routières.
- La méthode expérimentale, mise en œuvre en laboratoire, a permis de réaliser des essais géotechniques sur des échantillons prélevés tels que les limites d'Atterberg, la densité sèche maximale, l'optimum de compactage, le CBR (California Bearing Ratio), etc.
- La méthode comparative, qui a consisté à confronter les résultats obtenus aux critères exigés pour les différentes couches d'une structure routière [3].

Cette étude s'est limitée aux matériaux fournis par le gisement de Bugarula et aux essais réalisés en laboratoire, sans réalisation d'un essai en vraie grandeur sur le terrain.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités et expose les concepts théoriques liés à la mécanique des sols et à la construction routière.
- Le deuxième chapitre présente les matériaux et la méthodologie expérimentale employée au laboratoire.
- Le troisième chapitre expose les résultats des essais réalisés, suivis de leur interprétation et d'une discussion critique en rapport avec les objectifs de recherche.

Chapitre I. GÉNÉRALITÉS

I.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre pose les bases générales liées aux sols : la définition et les caractéristiques des sols, la classification des sols et l'utilisation des sols argileux dans la construction routière : les avantages et les inconvénients. Et en dernier lieu, il présente également les généralités sur les routes dans lesquelles on trouve un aperçu sur le réseau routier congolais, l'importance de la géotechnique routière ainsi qu'une notion générale sur les chaussées.

I.2 DEFINITIONS ET GENERALITES DES SOLS [4]

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène, d'origine minérale et organique et est constitué de grains et de pores. Le sol est donc un matériau à trois phases, phase solide (squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol.

I.2.1 Grains

Les grains dérivent de rochers massifs et forment le squelette du sol. Ils sont caractérisés par :
Leur taille : c'est pour estimer la quantité des grains d'une taille définie que l'on détermine la granulométrie.

Leur forme : la forme des grains (cubique, sphérique, plaquettes, etc.) et leur état de surface (rugueux, poli, etc.) ont une influence directe sur le comportement du sol.

D'une manière générale, l'irrégularité des grains augmente la stabilité. La nature des minéraux qui les composent, la nature des particules d'un sol a une influence sur certains paramètres du sol (perméabilité, compressibilité, résistance, transmission des forces), spécialement dans les sols fins. Certains minéraux peuvent conférer des propriétés.

I.2.2 Pores

Les pores sont les espaces vides entre les grains de sol. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau, et leur taille et distribution influencent fortement les propriétés mécaniques et hydrauliques du sol. Les principaux types de pores incluent :

Les macrospores : grands pores qui permettent un drainage rapide de l'eau.

Les micropores : petits pores qui retiennent l'eau par capillarité.

La teneur en pores peut être plus ou moins importante selon la granulométrie, la forme et la distribution des grains, et la compacité du sol. Leur présence est facile à visualiser dans les sables et graviers mais elle l'est moins dans les argiles ou limons où les pores sont beaucoup

plus petits. Lorsque le sol est sec, les pores sont remplis d'air. Lorsque, à l'opposé, les pores sont complètement remplis d'eau, on dit que le sol est saturé.

I.3 DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS [5]

• **Sol calcaire** : appelé également terre crayeuse, le principal composant est la chaux. Terre peu appréciée des jardiniers, elle est également détestée par de nombreux végétaux.



Figure I-1 : sol calcaire

• **Sol humifère** : c'est une terre très riche en humus qui est le résultat de la décomposition de matières organiques végétales. Facile à travailler, elle présente peu d'inconvénients.



Figure I-2 : Sol humifère

• **Sol limoneux** : avec le limon comme composant principal, c'est une terre riche et facile à travailler. Par contre, elle est instable et fragile.



Figure I-3 : Sol limoneux

- **Sol sableux ou sablonneux** : appelé également sol siliceux, c'est une terre principalement constituée par du sable. Si elle est facile à travailler, c'est une terre instable et peu fertile.



Figure I-4 : Sol sableux ou sablonneux

- **Sol argileux** : avec comme principal composant l'argile, c'est une terre lourde qui retient énormément l'eau. Elle est difficile à travailler mais est généralement assez fertile.



Figure I-5 : Sol argileux

I.4 L'ANALYSE ET IDENTIFICATION DES SOLS [6]

L'identification des sols implique la détermination de paramètres de nature et de paramètres d'état. Les paramètres de nature donnent des informations sur les caractéristiques intrinsèques du sol, qui restent constantes dans le temps. Ils comprennent le poids volumique des grains solides, la granularité, l'argilosité, les limites d'Atterberg et la teneur en matières organiques. En revanche, les paramètres d'état dépendent de l'état du sol et caractérisent son comportement sous l'effet d'une charge donnée. Ils comprennent la teneur en eau, l'indice des vides et la porosité.

La granulométrie, réalisée à l'aide de différents tamis, permet de déterminer précisément la composition d'un matériau en comparant sa courbe granulométrique avec le fuseau de prescription approprié. L'analyse granulométrique fournit des informations sur les types de tâches pour lesquelles les matériaux analysés peuvent être utilisés.

Le Tableau I-1. présente le classement des matériaux en fonction de leur diamètre.

Tableau I-1 Classement des matériaux suivant leur diamètre [7]

Matériau	Bloc rocheux	Cailloux	Graviers	Sables	Limon	Argiles
Diamètre	>200mm	20mm à 200mm	2mm à 20mm	0,02 mm à 2mm	2um à 0,02mm	<2um

Par la granulométrie, on identifie les sols fins et les sols grenus.

I.4.1 Essais sur les sols fins

La composition minéralogique, notamment la présence de minéraux argileux, ainsi que le niveau d'humidité, jouent un rôle crucial dans le comportement des sols fins.

a) Les limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont des seuils de teneur en eau qui définissent la classification des sols en termes de leur plasticité et de leur malléabilité, ce qui est particulièrement pertinent pour les sols fins. Les deux limites principales sont la limite de liquidité et la limite de plasticité, et elles indiquent la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe d'un état de consistance à un autre [8].

Les différents états des limites d'Atterberg sont repris suivant les indications du Tableau I-2. présente les différentes classifications des limites d'Atterberg en fonction de leurs états correspondants [8]

Tableau I-2 : classifications des limites d'Atterberg en fonction de leurs états correspondants [8]

Solide		Plastique	Liquide
Sans retrait	Avec retrait		
W _s		W _p	W _L
Retrait		Plasticité	Liquidité

Avec W_s, W_L, W_p sont les limites d'Atterberg déterminées en laboratoire sur la fraction du sol passant au tamis de 0,4mm (méthode de la coupelle de Casagrande).

A partir de ces limites, on détermine : l'indice de plasticité, l'indice de consistance, l'indice de liquidité.

❖ **L'indice de plasticité (IP)**

La teneur en eau d'un sol à l'état plastique est déterminée par l'indice d'Atterberg. Un indice d'Atterberg élevé indique une sensibilité accrue du sol aux conditions atmosphériques, car plus l'indice d'Atterberg est élevé, plus le sol aura une tendance importante à se gonfler lorsqu'il est humidifié et à se rétracter lorsqu'il se dessèche. Cet indice permet de classer les sols suivants l'échelle ci-dessous :

- ✓ $0 < I_p < 5$: sol non plastique ;
- ✓ $5 < I_p < 15$: sol peu plastique ;
- ✓ $15 < I_p < 40$: sol plastique ;
- ✓ $I_p > 40$: sol très plastique [9].

Le Tableau I-3. Présente les types de sol en fonction de l' I_p .

Tableau I-3 Types de sol en fonction de l' I_p [4]

Indice de Plasticité	Type de sol
<1%	Pulvérulent
$1\% < I_p < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_p < 17\%$	Argile sableuse
$I_p > 17\%$	Argile

L'indice de plasticité est couramment utilisé pour mesurer l'argilosité et le potentiel de gonflement. Il représente la plage de teneurs en eau d'un sol donné correspondant à un comportement plastique de ce sol. Ainsi, si l'indice de plasticité du sol est élevé, le sol est dit argileux et ses variations de volume peuvent être importantes en fonction de la modification de sa teneur en eau. L'estimation du gonflement libre en fonction de l'indice de plasticité est mise en évidence par la classification de Sanglerat (1981) conformément au Tableau I-4.

Tableau I-4 Classification de Sanglerat (gonflement libre en fonction d' IP) [4]

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité I_p (%)
Bas (B)	0-10
Moyen (M)	10-35
Haut (H)	35-55
Très haut (TH)	> 55

❖ **L'indice de consistance (Ic)**

Pour déterminer cet indice, il est nécessaire de prendre en compte la teneur en eau naturelle (W) du sol ainsi que ses limites d'Atterberg. Une fois mesuré, cet indice nous permet de classer le sol en fonction de son adhérence et de son état.

Les valeurs de cet indice sont présentées dans le Tableau I-5, qui donne la classification des sols.

- ✓ $I_c > 1$: Sol à l'état solide ;
- ✓ $0 < I_c$: Sol à l'état plastique ;
- ✓ $I_c < 0$: Sol à l'état liquide.

Tableau I-5 : Echelle de classification des sols suivant les valeurs d'Ic [4]

	O à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 0,75	0,75 à 1
Etat	Plastique			
Consistance	Très molle	Molle	Très plastique	Plastique

❖ **L'indice de liquidité (Il)**

- ✓ Si $Il < 0$: le sol est à l'état solide ou semi solide ;
- ✓ Si $0 < Il < 1$: le sol est à l'état plastique ;
- ✓ Si $Il \geq 1$: le sol est à l'état liquide [9]

Le Tableau I-6. Présente l'état de consistance de sol en fonction de l'indice de liquidité.

Tableau I-6 Etat de consistance de sol en fonction de l'I_l [10]

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_l < 0$	Très dure
$0 < I_l \leq 1$	Dure à très plastique
$I_l > 1$	Fluide

Dakstana (1965) propose une classification qui permet d'évaluer indirectement le potentiel de gonflement en fonction de la limite de liquidité; cela est repris dans le Tableau I-7.

Tableau I-7 Classification de Dakstana (Potentiel de gonflement en fonction de WL [4])

Limite de liquidité W_L(%)	0-20	20-35	35-50	50-70	70-90	> 90
---	------	-------	-------	-------	-------	------

Potentiel de Gonflement	Non Gonflant (NG)	Faible (F)	Moyen (M)	Elevé (E)	Très élevé (TE)	Extrêmement élevé (EE)
--------------------------------	-------------------	------------	-----------	-----------	-----------------	------------------------

I.4.2 Classification des sols [8]

La classification des sols repose sur divers paramètres et est basée sur leur géométrie. Son objectif est de regrouper les sols ayant des caractéristiques similaires en termes de nature, d'état et de comportement pour une application géotechnique spécifique telle que les routes ; les fondations etc...

Plusieurs systèmes de classification sont utilisés, notamment le système de classification Unified Soil Classification System (USCS) établi par Casagrande, la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) identique à l'USCS, la classification de l'American Association of State Highways Officials (AASHTO) et le Guide des Terrassements Routiers (GTR).

I.4.2.1 La classification L.C.P.C

Pour la classification LCPC, l'objectif est d'identifier et de nommer un sol en se basant sur des mesures quantitatives, en particulier la granulométrie et les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (Atterberg). Cette classification comprend trois types de sols principaux : les sols fins, les sols granulaires et les sols organiques.

a) Les sols fins.

Également appelés sols cohérents, ont un plus grand diamètre de grains inférieur à 20 µm et présentent une cohésion (argile, limon). Leur comportement varie considérablement en fonction de la teneur en eau, passant d'un état solide à un état plastique ou liquide. Leur cohésion est assurée par le frottement et les forces d'attraction entre les grains, qui dépendent de la forme et de la compacité des grains, ainsi que de la teneur en eau. Ces sols sont résistants au cisaillement et à la traction, imperméables, mais sensibles aux variations d'humidité, ce qui peut entraîner des gonflements ou des retraits.

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg, qui sont précisés dans le diagramme de plasticité. En fonction de la position du point représentatif sur le diagramme, défini par la limite de liquidité et l'indice de plasticité, quatre grandes catégories principales sont distinguées : les limons très plastiques, les limons peu plastiques, les argiles très plastiques et les argiles peu plastiques.

La figure I-6 présente la classification des sols fins (diagramme de plasticité)

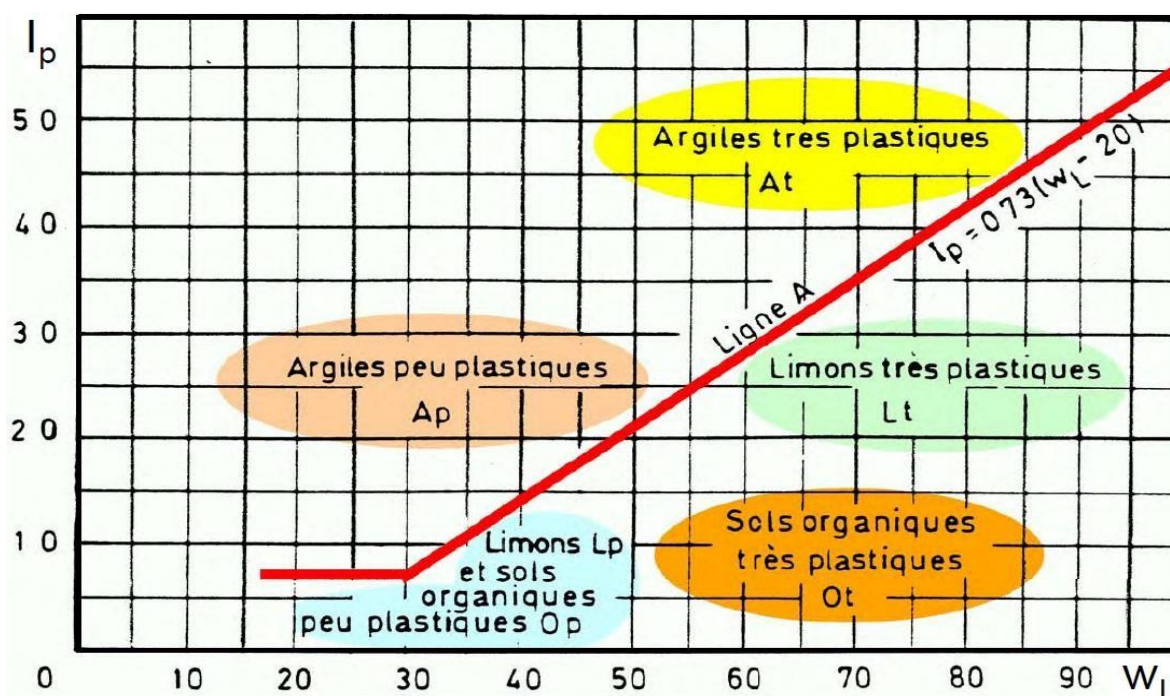


Figure I-6 : Classification des sols fins: Diagramme de plasticité [10].

b) Les sols grenus

Appelés encore sols pulvérulents dont le plus grand diamètre des grains est supérieur à 20 μ m sans cohésion (sable, gravier). Leur comportement est régi par les propriétés du squelette solide (peu influencé par l'eau). Les forces de frottement entre les grains dépendent de la forme, la compacité des grains, la résistance au cisaillement,...

Le sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau. Leur classification se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg.

c) Les sols organiques

Les sols organiques ont une teneur en matière organique supérieur à 10%.

I.4.2.2 La classification des sols selon la nomenclature GTR est effectuée conformément à la norme NF P 11-300

Dans cette classification, on distingue 3 familles à savoir : les sols de classe A, B, C et D ; les matériaux rocheux de classe : R ainsi que les sols organiques et sous-produits industriels de classe F.

Les 4 classes de sols (famille) : classe A : sols fins, classe B : sols sableux et graveleux avec fines, classe C : sols comportant des fines et des gros éléments, classe D : sols insensibles à l'eau.

Cette classification représente un réel intérêt pratique et est utilisée dans les travaux de terrassement. Le graphique donnant la classification GTR est repris sur la Figure I-7.

Le GTR fournit des recommandations pour l'utilisation de différents types de sols en tant que remblais ou couches de forme. Cependant, certains sols sont exclus par le GTR dans certaines conditions pour les travaux de terrassement. Par exemple, un sol de type A2, lorsqu'il est humide, présente des caractéristiques mécaniques faibles, ce qui rend sa mise en œuvre difficile. C'est pourquoi le GTR préconise une solution consistant à traiter ces sols avec de la chaux et/ou un liant hydraulique.

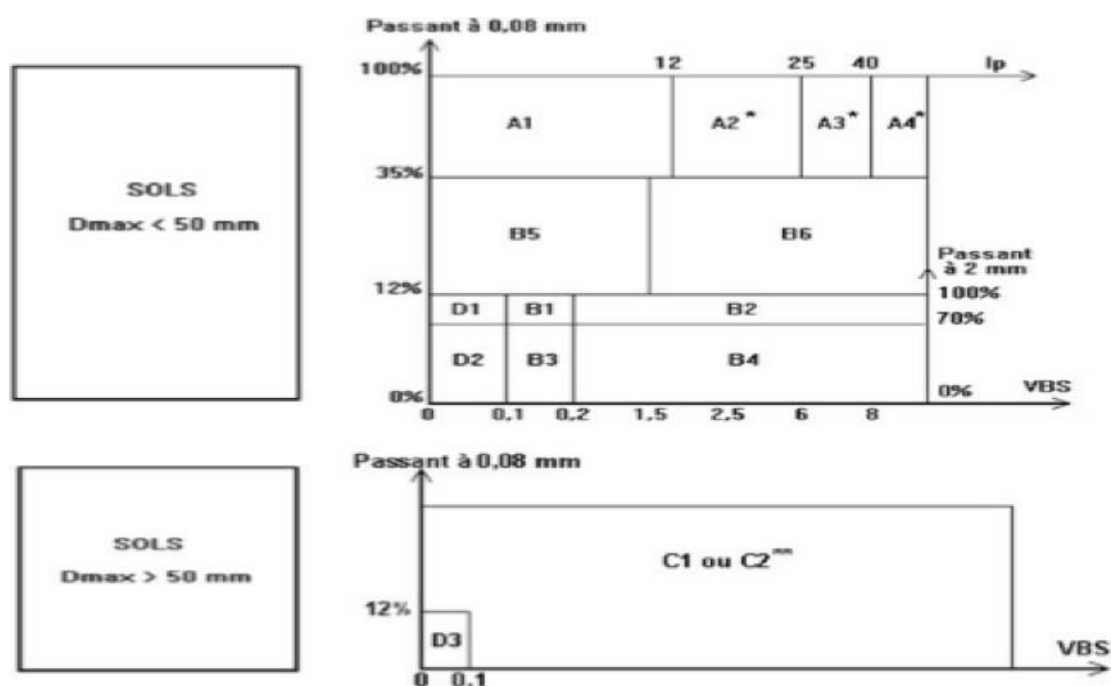


Figure I-7 Diagramme de classification GTR de sol [4].

Les sols (première famille) sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

Tableau I-8 Tableau simplifié de la classification des sols GTR [9]

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

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

1.5 INFLUENCE DE L'EAU SUR LES PROPRIETES DES SOLS FINS [9]

Les sols fins, en particulier les sols argileux, présentent un comportement fortement influencé par la présence de l'eau. Cette influence est principalement liée à l'eau faiblement liée (ou adsorbée) qui se situe entre les particules solides du sol. La présence et l'épaisseur de cette pellicule d'eau conditionnent en grande partie les propriétés mécaniques et physiques du sol, notamment la plasticité et la cohésion. Lorsque la pellicule d'eau entourant les particules est de faible épaisseur, les forces d'attraction entre les particules sont plus importantes, ce qui confère au sol une résistance relativement élevée. En revanche, l'augmentation de la teneur en eau entraîne un épaissement de cette pellicule, réduisant les forces inter particulaires et, par conséquent, la résistance du sol. Ainsi, l'humidification des sols argileux se traduit généralement par une diminution de leur portance. L'augmentation de la teneur en eau provoque également une variation volumique du sol. En présence d'eau, les sols argileux ont tendance à augmenter de volume, phénomène connu sous le nom de gonflement. À l'inverse, lors de l'assèchement, l'amincissement des pellicules d'eau s'accompagne d'une diminution du volume du sol, appelée retrait ou rétrécissement. Ces variations volumétriques peuvent engendrer des désordres importants dans les ouvrages routiers, tels que des fissurations ou des déformations de la chaussée. La cohésion des sols fins dépend également de la stabilité de l'organisation des particules et des molécules d'eau. Sous l'effet de sollicitations dynamiques, telles que le passage répété des charges roulantes, cette organisation peut être perturbée,

entraînant une baisse temporaire de la résistance du sol. Toutefois, avec le temps et en l'absence de nouvelles sollicitations, une certaine reconstitution de la résistance peut se produire.

De manière générale, les sols argileux se caractérisent par une plasticité élevée, une sensibilité marquée à l'eau, des phénomènes de gonflement à l'humidification, de retrait à l'assèchement et, dans certains cas, une faible perméabilité. À l'inverse, la présence de l'eau influence beaucoup moins les propriétés mécaniques des sols grossiers, tels que les sables, dont le comportement est principalement régi par la granulométrie et l'état de compacité.

Par ailleurs, certains sols fins particuliers peuvent présenter un comportement d'affaissement brutal lors de l'humidification. C'est notamment le cas des sols de type loess, caractérisés par une structure macroporeuse, une porosité élevée, une faible teneur en eau naturelle et un faible degré de saturation. À l'état sec, ces sols peuvent présenter une résistance relativement élevée, mais l'humidification entraîne une perte rapide de résistance due à un changement soudain de la structure interne du sol, provoquant un tassement important.

I.6 PROBLEMES LIES A L'UTILISATION DES SOLS ARGILEUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE

I.6.1 Phénomènes de gonflement et retrait

Si le phénomène de gonflement lors de l'humidification des sols semble « simple » de prime abord, ce phénomène s'avère assez complexe à l'échelle de la microstructure d'un sol. En effet, il peut se produire en phase vapeur ou au contact d'eau liquide à partir d'un état sec ou humide, ce qui entraîne l'apparition de gradient plus ou moins fort à partir de la surface des sols ou des échantillons. Notez qu'en géotechnique ou dans le domaine des fondations, ce sont les interactions avec l'eau liquide (avec la pluviométrie) qui sont généralement considérées et non pas les interactions avec la phase vapeur (excepté pour les sols les plus superficiels).

Le retrait quant à lui est souvent considéré comme le pendant du gonflement alors qu'il ne se produit qu'en présence d'air plus ou moins humide. Retrait et gonflement sont des phénomènes complexes également car ils mettent en jeu différents types d'eau que l'on peut caractériser par l'énergie (par exemple thermique) nécessaire pour les extraire. On rencontre l'eau inter feuillet fortement liée aux cations interfoliaires ou à la surface de l'argile, l'eau chimie-sorbée formant des groupements hydroxyles réactifs sur les surfaces latérales des feuillets argileux, l'eau

physico-sorbée dans la double couche autour des particules argileuses qui possèdent une charge et l'eau gravitaire libre de circuler.

Ces différents types d'eau sont indissociables des différents types de pores présents dans le sol allant d'une taille nanométrique à pluri micrométrique voire millimétrique (espace inter feuillet, pore lenticulaire ou intra-particulaire, inter particulaire ou intra-agrégats, et pore inter-agrégats voire inter-cluster – le terme cluster renvoie à une motte ou un bloc de sol). Une description précise de la microstructure (organisation) des particules du sol est alors nécessaire pour bien comprendre le processus de gonflement et de retrait et leur impact sur les propriétés des sols [11].

Ce phénomène est particulièrement problématique pour les bâtiments et les infrastructures, car les variations de volume du sol peuvent provoquer des fissures et des déformations.

1. Tassements

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation. Le tassement des sols argileux se produit lorsque le sol argileux se compacte sous l'effet de charges, comme le poids des bâtiments ou des véhicules. Ce phénomène peut être accentué par des variations de teneur en eau, où le sol se rétracte en période de sécheresse et se gonfle lors des pluies. Le tassement peut entraîner des déformations et des fissures dans les structures construites sur ces sols, affectant leur stabilité et leur durabilité. Pour prévenir ces problèmes, il est essentiel de bien concevoir les fondations et de prendre en compte la nature du sol lors de la construction.

2. Glissements

Les glissements de terrains sont des déplacements lents d'une masse de terrains cohérents le long d'une surface de rupture généralement courbe ou plane. L'extension des glissements de terrain est variable, allant du simple glissement de talus très localisé au mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant. Les profondeurs des surfaces de glissement varient ainsi de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. On parle de glissements superficiels dont les signes visibles en surface sont souvent spectaculaires (fissures dans les murs des habitations, bourrelets dans les champs, poteaux penchés...) et de glissements profonds qui présentent moins d'indices observables et qui sont donc plus difficilement détectables [12].

3. Sensibilité en eau

Les matériaux susceptibles de gonfler (et de se rétracter) sous l'action de l'eau sont les sols argileux, qu'on appelle couramment « argiles », « glaises », « marnes » ou « limons ». Ce sont des sols fins qui contiennent une proportion importante de minéraux argileux naturels. Ces sols sont collants à la main lorsqu'ils sont humides et durs quand ils sont desséchés. Le minéral argileux est essentiellement la kaolinite, famille la plus représentée dans le sous-sol français et qui est plutôt stable structurellement. On trouve également les illites, les chlorites et les montmorillonites, ces dernières dites très « gonflantes » (très sensibles aux variations hydriques du sol). En effet, les argiles sont constituées d'un empilement de feuillets. Dans le cas des montmorillonites, ces feuillets sont plus distants que pour les autres types d'argiles. Ainsi, les montmorillonites laissent pénétrer une plus grande quantité d'eau entre ces feuillets, d'où le fait qu'elles soient plus gonflantes.

I.7 QUELQUES CAS DE PATHOLOGIE

Les perturbations ou désordres provoquées par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans plusieurs pays à climat où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

I.7.1 Cas de bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants : la fissuration des structures ; la distorsion des couvertures ; rupture des canalisations et le décollement des bâtiments.

I.7.2 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.

Pour les chaussées ou les infrastructures routières, les cas de perturbations observées sont les suivantes : les fissurations longitudinale et transversales, les nids de poule, l'affaissement les faïençages, les arrachements et les ornières.

I.8 NOTION SUR LES ROUTES

Depuis la création de l'univers, Dieu a donné une grande richesse à l'homme en l'occurrence la terre, c'est ainsi que le domaine de route constitue une partie très importante du patrimoine national d'un pays. Elle est alors un facteur très important de développement économique et social ; entre les villes, les provinces, les pays et des civilisations.

I.8.1 Définition

Une route est définie comme une voie de communication terrestre, aménagée pour permettre la circulation des véhicules tels que les voitures, les camions, les motos, les vélos, etc. ainsi que la circulation des personnes. Elle est utilisée pour le transport des marchandises ou d'autres activités. Elle est un élément important de l'infrastructure de transport [13].

I.8.2 Importance d'une route

La route est importante sur plusieurs plans :

- ✓ Sur le plan social, la route facilite la communication et la fréquentation entre les hommes, l'implantation et l'accessibilité des infrastructures communautaires, (école, dispensaire, marcher etc...),
- ✓ Sur le plan économique, elle permet l'évacuation des produits agricoles vers les centres villes, l'approvisionnement de campagne de produits manufacturés
- ✓ Sur le plan politico-administratif.

Les routes peuvent être classées dans les différentes catégories en fonction de leur importance, leur capacité et leur utilisation. Elles sont classifiées de la manière suivante :

- ✓ **Les autoroutes** : ce sont des routes principales à grande vitesse qui relient les grandes villes et les régions. Elles sont conçues pour un trafic rapide et fluide et sont souvent séparées par une barrière centrale pour empêcher la circulation en sens inverse. Les autoroutes sont également appelées voies rapides.
- ✓ **Les routes nationales** : ce sont des routes principales qui traversent le pays et relient les grandes villes et les centres régionaux. Elles sont souvent à deux voies et sont largement utilisées pour le transport de marchandises et de passagers.

- ✓ **Les routes régionales** : ce sont des routes qui relient les villes et les villages d'une région donnée. Elles sont souvent à une ou deux voies et sont utilisées pour le transport local.
- ✓ **Les routes de liaison** : ce sont des routes secondaires qui relient les centres urbains et les zones rurales. Elles sont souvent étroites et sinueuses et sont utilisées pour les déplacements locaux.
- ✓ **Les routes de quartier** : ce sont des routes qui desservent les quartiers résidentiels et les zones commerciales locales. Elles sont souvent à une voie et sont utilisées pour les déplacements locaux.

I.8.3 Réseau routier congolais

Le réseau routier de la RDC comprend au total 153.209 km de routes répartis comme suit : 58.509 km de routes d'intérêt général, à charge du Ministère des Infrastructures, Travaux Publics et Reconstruction, placés sous la gestion de l'Office des Routes « OR en sigle », dont environ 3.000 km sont revêtus. Et 87.300 kilomètres de routes sont d'intérêt local ou de desserte agricole (DVDA). Ce réseau est reparti en 3 catégories selon leur importance :

- ✓ 21 140 Km des routes nationales (RN)
- ✓ 20 124 Km des routes provinciales prioritaires (RPP)
- ✓ 17 245 Km des routes provinciales secondaires (RPS)

Le réseau comprend aussi 1 965 ponts pour 25 130 m linéaire et 187 bacs (à trailles, à moteurs et à pirogues) [14].

En guise d'illustration, le Tableau I-9 fait la synthèse sur le réseau routier congolais, sur les routes nationales revêtues et non revêtues.

Tableau I-9 : Réseau routier congolais [15]

Province	Routes	Routes prioritaires	Routes régionales	Total
Bas-Congo	1380	891	869	3140
Bandundu	2267	3566	3160	8993
Equateur	2970	2781	3158	8909
Province Orientale	3706	3484	3075	10265
Ex kivu	2905	2607	1932	7444
Katanga	4035	4054	2958	11046

Kasaï Occidental	1998	1141	859	3998
Kasaï Oriental	1457	1627	1234	4318
Kinshasa	272	-	-	272
Total	20989	20151	17245	58385

I.8.4 Notion générale sur les chaussées [16]

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme.

I.8.4.1 Constitution d'une chaussée

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini. Vu leur rôle, les chaussées se présentent comme des structures multicouches dont les épaisseurs doivent être suffisantes de manière à supporter sans dégradation la pression verticale transmise au sol. Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes. En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol :

1) Le sol support

Les structures de chaussées reposent sur un ensemble dénommé « Plate - forme support de chaussée » constitué du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme. Les plates-formes sont définies à partir :

- ✓ De la nature et de l'état du sol.
- ✓ De la nature et de l'épaisseur de la couche de forme.

2) Couche de forme

La couche de forme est constituée généralement des matériaux disponibles sur le chantier ou localement, elle sera constituée de matériaux sableux ou graveleux propres. Elle a pour rôle d'améliorer et d'uniformiser certains sols fins non traités possédant des caractéristiques géotechniques médiocres. Actuellement, on tient compte d'améliorer de la portance du sol support à long terme, par la couche de forme. L'épaisseur de la couche de forme est en général variable entre 40 et 70cm.

3) Les couches d'assise

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches :

- ✓ **Couche de fondation** : elle assure une bonne uniformité et bonne portance de la chaussée finie, et aussi, même le rôle que celui de la couche de base.
- ✓ **Couche de base (G.B)** : pour résister aux déformations permanentes sous l'effet de trafic ainsi lâche du sol, elle reprend les efforts verticaux et repartis les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes. L'épaisseur de la couche de base varie entre 10 et 25cm.

4) La couche de surface

A son tour, la couche de surface a généralement une structure bicouche :

- ❖ **La couche de roulement** : la couche de surface subit directement les agressions du trafic et de climat Elle a pour rôle essentiel d'encaisser les efforts de cisaillement provoqué par la circulation. Elle est en général composée d'une couche de roulement qui a pour rôle :
 - ✓ D'imperméabiliser la surface de chaussée ;
 - ✓ D'assurer la sécurité (par l'adhérence) ;
 - ✓ D'assurer le confort des usages (diminution de bruit, bon uni).
- ❖ **La couche de liaison** : l'apport structurel de cette couche est secondaire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée. La couche de liaison a pour rôle essentiel d'assurer une transition, avec les couches inférieures les plus rigides. En général l'épaisseur de la couche de roulement varie entre 6 et 8cm. Le choix de la couche de surface doit résulter de la prise en considération de plusieurs objectifs tels que :
 - ✓ La sécurité et le confort des usagers, en relation avec les caractéristiques de surface ;
 - ✓ Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de divers glaçages ;
 - ✓ L'impact sur l'environnement, avec notamment la recherche d'une réduction des bruits déroulement ;
 - ✓ Les possibilités de régénération des caractéristiques de surface.

Suivant la description fonctionnelle des couches de chaussée, le guide technique français sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussée (LCP 94) propose un panel de matériaux de construction qu'on peut regrouper en deux grandes familles selon qu'il soient liés ou non liés :

- ✓ Les matériaux granulaires non liés : ou encore Graves Non Traitées (GNT), utilisés pour la réalisation des chaussées à faibles trafics ;

- ✓ Les matériaux granulaires liés : utilisés pour la réalisation de structures de chaussées à forts trafics.

Si l'on se réfère à la couleur du liant utilisé pour former le mélange avec les matériaux granulaires, on trouve :

- ✓ Les matériaux noirs : traités aux liants hydrocarbonés ;
- ✓ Les matériaux blancs : traités aux liants hydrauliques (MTLH).

I.8.4.2 Couches d'une chaussée

On distingue 4 couches d'une chaussée qui sont les suivantes : la couche de fondation, la couche base, la couche de roulement et la couche de forme.

❖ **La couche de forme** : c'est la couche de sol rapportée ou traitée en place, destinée à constituer une assise satisfaisante (portance, homogénéité) lorsque le sol existant ou le remblai utilisé ne présente pas les qualités suffisantes. Cette couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée a une double fonction :

- ✓ Pendant la phase de travaux, elle protège le sol support, établit la qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussées ;
- ✓ Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de rendre plus homogène et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place ainsi que de les protéger du gel.

❖ **La couche de fondation** : cette couche est posée directement sur le sol support ou sur la couche de forme si elle existe, la plupart des matériaux routiers conviennent pour son élaboration, elle est destinée à supporter les différentes couches constituant la chaussée et d'absorber les contraintes de la circulation transmises en profondeur, en répartissant les charges sur la couche de forme. Elle se compose d'une grave (mélange de cailloux, graviers et sables) ; pour les chaussées de faible trafic, de tout venant de bonne qualité et à défaut, des matériaux traités avec un liant hydraulique qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau ou un liant hydrocarboné contenant du bitume pour obtenir une plus grande résistance.

❖ **La couche de base** : les matériaux constituant cette couche doivent résister aux contraintes résultant du trafic. Son épaisseur est généralement de 15 cm. Elle subit plus de contraintes verticales que la couche de fondation et des efforts de cisaillement d'autant plus importants que la couche de surface est mince.

❖ **La couche de roulement** : c'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle couvre la couche de base et elle doit résister en premier lieu aux efforts horizontaux des pneumatiques (accélération et freinage), en second lieu, elle s'oppose à la pénétration de l'eau aux couches sous-jacentes.

I.8.4.3 Structures d'une chaussée

Les structures des chaussées constituent des ensembles très complexes, ceci est dû essentiellement à un ensemble de variables qui interagissent et influencent aussi bien la conception que les performances des chaussées. Chaque couche composant la structure de chaussée joue un rôle déterminant sur les performances ultérieures. Les matériaux constitutifs de différentes couches doivent présenter des propriétés leur permettant d'être aptes à assurer le rôle respectif de chaque couche. La structure de chaussée sera établie selon ses propriétés. Bien que le sol support qui constitue l'infrastructure d'une chaussée, ne soit pas souvent considéré comme une couche, ses caractéristiques influencent la conception d'une chaussée.

La structure de la chaussée (ou corps de chaussée) est constituée de différentes couches (fondation et base) qui répartissent la charge des véhicules sur le sol naturel sans déformation. Elle permet de réduire la pression transmise au sol et d'assurer une interface mécanique entre le véhicule et le sol. Les chaussées sont des structures multicouches mises en œuvre sur une plateforme support de chaussée constituée du sol terrassé.

On distingue trois types des structures d'une chaussée :

a) Les chaussées souples

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées sont traitées aux liants hydrocarbonés. La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée. Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

b) Les chaussées semi-rigides

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). On parle également de chaussées bitumineuses épaisses. L'épaisseur des couches d'assise est plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

c) Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol support, les couches suivantes : une couche de forme, une couche de fondation et une couche de roulement en béton de ciment.

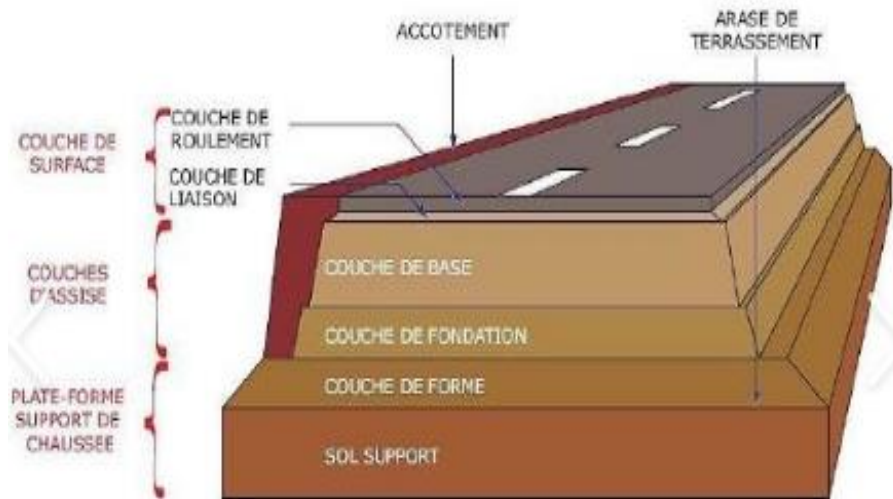


Figure I-8 : Structure d'une chaussée [7]

I.8.5 Importance de la géotechnique routière [13]

La géotechnique routière est une discipline importante dans la construction et l'entretien des routes. Elle permet de comprendre les caractéristiques du sol et de la roche sous-jacents afin de garantir la sécurité et la durabilité des routes, ce qui est essentiel pour une conception et une construction adéquate des routes. Elle permet également de réduire les risques d'effondrement et d'instabilité de la route par la connaissance des propriétés du sol et de la roche, de prolonger la durée de vie des routes ainsi que d'économiser des coûts car, en comprenant les propriétés du sol et de la roche, les ingénieurs peuvent concevoir des routes plus efficaces et moins coûteuses à construire et à entretenir.

Les études géotechniques devront donc lever un maximum d'incertitude sur le sol et le sous-sol pour la conception d'un projet routier. Pour ce faire, il est nécessaire de donner aux études géotechniques toute leur importance.

I.9 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a été structuré en plusieurs sections. Dans un premier temps, il a été abordé les notions fondamentales relatives aux sols afin de mieux comprendre leur nature et leur comportement. Par la suite, il a été approfondi la notion de chaussée, en lien avec le contexte de notre étude.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation du milieu d'étude ainsi qu'à la description des méthodes et des équipements utilisés au laboratoire pour la détermination des caractéristiques géotechniques du sol prélevé à la carrière de Bugarula, située à Idjwi Nord.

Chapitre II. : MÉTHODOLOGIE

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente l'approche méthodologique adoptée pour mener à bien cette étude sur la caractérisation des sols du gisement de Bugarula à Idjwi, dans la perspective de leur utilisation en construction routière. Il décrit les différentes étapes de la recherche, allant de la collecte des données à la réalisation des essais en laboratoire, en passant par l'échantillonnage et l'identification des sols.

La méthodologie s'articule autour des points suivants : la recherche documentaire, la localisation et description du site d'étude, le prélèvement des échantillons, l'identification et la classification des sols, ainsi que leur caractérisation géotechnique. Les essais ont été réalisés au laboratoire de Génie Civil de la Faculté des Sciences et Technologies de l'ULPGL/Goma.

II.2 PRÉSENTATION DU MILIEU D'ETUDE [1] [2]

Le présent travail s'inscrit dans le cadre géographique du groupement de Bugarula, situé dans la chefferie de Rubenga, territoire d'Idjwi, dans la province du Sud-Kivu à l'est de la République Démocratique du Congo. La zone d'étude concerne précisément le gisement de Bugarula, exploitée de manière artisanale pour l'extraction de matériaux naturels, destinée principalement à des usages locaux.



Figure II-1 : la vue panoramique du gisement de Bugarula [17]

II.2.1 Situation géographique

Le groupement de Bugarula est l'un des trois groupements de la chefferie de Rubenga, située dans la partie nord du territoire d'Idjwi. Il est accessible principalement par voie lacustre depuis Bukavu ou Goma, puis par des pistes locales reliant les différentes entités du groupement.

La carrière étudiée est implantée dans une zone à vocation rurale, caractérisée par une occupation du sol dominée par l'agriculture et l'exploitation artisanale des ressources naturelles. L'étendue apparente du gisement de Bugarula est estimée entre 2,5 et 3 hectares, surface minimale généralement considérée comme exploitable pour une carrière locale de matériaux meubles, et susceptible de répondre aux besoins des projets d'infrastructures routières de proximité sur l'île d'Idjwi.

II.2.2 Relief et topographie locale

Le relief du groupement de Bugarula est typique du nord de l'île d'Idjwi. Il est caractérisé par des collines à pentes modérées, séparées par des zones légèrement déprimées et des plateaux exploités pour l'agriculture. La carrière est implantée sur un terrain légèrement incliné.

L'altitude dans la zone de Bugarula se situe globalement entre 1 400 et 1 600 m au-dessus du niveau de la mer.

II.2.3 Climat

Le climat de la zone de Bugarula est de type tropical humide, tempéré par l'altitude. Il se caractérise par une longue saison pluvieuse s'étendant généralement de septembre à mai, et une saison sèche plus courte, de mai à août. Les températures moyennes annuelles varient entre 18 °C et 22 °C, avec une pluviométrie annuelle estimée entre 1 200 et 1 600 mm.

II.2.4 Végétation et occupation du sol

La zone de Bugarula présente une végétation essentiellement anthropisée, dominée par des cultures vivrières telles que le bananier, le manioc, les haricots et les patates douces, associées à quelques zones boisées résiduelles. La couverture végétale naturelle a été fortement réduite par la pression démographique et les activités agricoles.

L'exploitation artisanale du gisement s'intègre dans ce contexte rural, avec une extraction manuelle des matériaux utilisée localement, notamment pour la fabrication de briques et les aménagements domestiques.

II.2.5 Contexte géologique et enjeux géotechniques

Sur le plan géologique, la zone de Bugarula appartient à la partie nord de l'île d'Idjwi, où dominant des formations issues de l'altération de roches éruptives acides, principalement

granitiques, associées localement à des dépôts sédimentaires meubles. Ces caractéristiques géologiques suggèrent une diversité des sols, ce qui rend indispensable une étude géotechnique pour évaluer leur aptitude à la construction routière.

II.3 ECHANTILLONNAGE

Avant toute opération de prélèvement, une préparation minutieuse du terrain a été réalisée. Cela a consisté à dégager et nettoyer soigneusement la surface du sol aux emplacements retenus pour l'échantillonnage, afin d'éliminer les débris organiques, les matériaux rapportés et toute couche superficielle perturbée. Cette étape visait à éviter toute contamination des échantillons et à garantir leur représentativité par rapport à la structure naturelle du sol en place, conformément aux recommandations usuelles en géotechnique [18].

L'échantillonnage a été effectué en saison sèche, pour limiter l'influence de l'humidité sur les propriétés des sols. Trois points de prélèvement ont été choisis dans la carrière de Bugarula, espacés d'environ 40 m, afin de représenter la variabilité des matériaux présents sur le site.

À chaque point, des échantillons représentatifs d'environ 100 kg ont été prélevés manuellement à l'aide de houes et de pelles, puis conditionnés dans des sacs hermétiques pour préserver l'humidité et garantir leur intégrité jusqu'aux essais en laboratoire.

Deux types d'échantillons ont été considérés : des échantillons remaniés, destinés aux essais d'identification, de classification et de compactage et des échantillons non remaniés, conservant la structure naturelle du sol, utilisés pour les essais nécessitant l'intégrité du matériau.

Cette démarche a permis d'obtenir des matériaux représentatifs du gisement de Bugarula, indispensables pour l'évaluation fiable des propriétés géotechniques.

La Figure II-2 montre les images des sols prélevés dans le gisement de Bugarula à Idjwi-Nord.

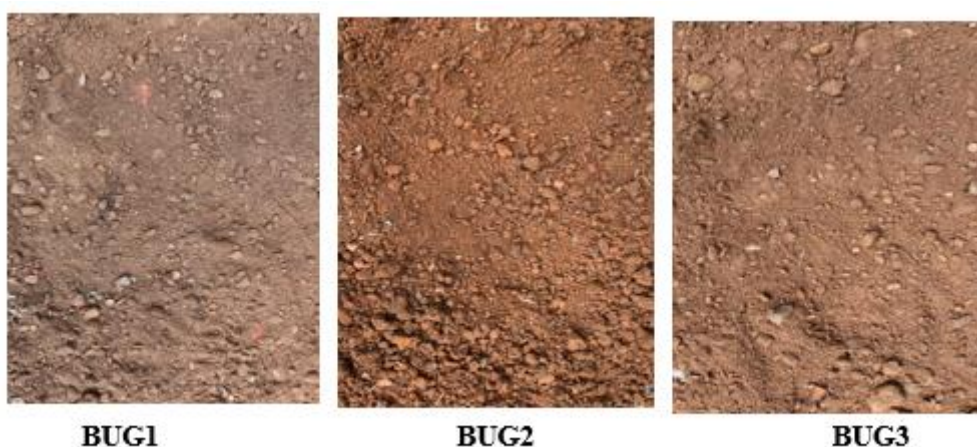


Figure II-2 : Echantillons des sols prélevés dans le gisement de Bugarula

II.4 ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS

Les essais d'identification permettent de reconnaître les principales caractéristiques physiques des sols, afin de les classer et d'en évaluer le comportement. L'identification des sols s'est effectuée à partir des essais normalisés au laboratoire de Génie Civil de l'ULPGL-Goma sur des échantillons remaniés représentatifs des sols du gisement de Bugarula. La classification quant à elle, s'est effectuée selon les prescriptions de normes GTR et du diagramme de Casagrande.

Parmi les essais effectués, on retrouve : la teneur en eau naturelle, la masse volumique apparente, la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'essai Proctor, l'essai de gonflement/retrait et l'essai CBR.

II.4.1 Teneur en eau naturelle du sol [19]

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau contenue dans le sol tel qu'il a été prélevé, selon la norme NF P 94-050.

a. Matériels et appareillage

Pour cet essai, il a été nécessaire d'utiliser les matériels ci-dessous :

- Une balance ;
- Une étuve ;
- Des tares.

Les figures II-3 et II-4, respectivement l'étuve de chauffage et Balance de précision et ainsi la tare.



Figure II-4 : Etuve de chauffage



Figure II-3 : Balance de précision et la tare

b. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de sol représentatif ;
- Placer ce prélèvement sur un verre de montre de masse T ;
- Passer immédiatement l'ensemble de masse m, le mettre à l'étuve à 105°C jusqu'à sa dessiccation complète et masse stable au bout de 24h ;
- Passer l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve pour obtenir la masse sèche md.

c. Exploitation des résultats

Elle est déterminée à partir de la formule II.1 :

$$W = \frac{mh - md}{md} \quad (\text{II.1})$$

Avec

- w : la teneur en eau exprimée en pourcentage
- T : la masse de la tare
- mh : la masse du sol humide y compris celle de la tare
- md : la masse du sol sec y compris celle de la tare

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

La relation II.2, est l'expression de la teneur en eau :

$$W = \left(\frac{W_w}{W_s} \right) \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- W : la teneur en eau exprimée en pourcentage
- W_w : le poids d'eau contenu dans le matériau
- W_s : le poids sec du matériau

II.4.2 Masses volumiques

On en distingue la masse volumique apparente, masse volumique absolue ainsi que la masse volumique sèche.

II.4.2.1. Masse volumique apparente

Elle consiste à évaluer le rapport entre le poids du sol et le volume du sol à une teneur en eau donnée. Cet essai s'effectue directement après l'essai de la détermination de la teneur en eau W et cela suivant la norme NF P 94-054 [19].

a) But de l'essai

Détermination de la masse volumique apparent d'un sol. Connaitre la masse volumique apparente d'un sol nous aide à calculer la quantité de sol pour les remblayages.

b) Matériels et appareillages :

- ✓ Une moule normalisée de volume connu V ;
- ✓ Une balance de précision ;
- ✓ Un outil à arase

c) Mode opératoire :

- ✓ Prélever une certaine quantité d'échantillon de sol (passant au tamis de 2mm) ;
- ✓ Déterminer, par pesée sur la balance, la masse m_0 du moule ;
- ✓ Bien remplir le moule de l'échantillon de sol et araser sa surface supérieure ;
- ✓ Peser l'ensemble pour déterminer la masse m_1 .

d) Exploitation des résultats

La masse volumique apparente ρ est obtenue suivant la norme NF P 94-054 par la relation II.3 :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{II. 3})$$

Où $m = m_1 - m_0$

Avec :

- ρ : la masse volumique apparente ;
- m : masse du matériau ;
- V : volume du moule normalisé.

II.4.2.2. Masse volumique absolue

L'essai consiste à déterminer la masse volumique des particules solides du sol. La masse a été obtenue par pesage et le volume a été mesuré au pycnomètre selon la norme NF P 94-054 [19]. Cet essai s'applique à tout échantillon de sol (intact ou remanié) dont la fraction granulaire n'excède pas 2 mm.

a) But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer le volume absolue d'un sol nous pour aider à mieux connaître comment et combien compacter le sol.

b) Matériels et appareillages

- Un pycnomètre de volume minimal 50 cm³ (avec bouchon rodé) ;
- Etuve ;
- Tamis de 2mm ;
- Mortier et pilon ;
- Plaque chauffante et une balance de précision.

c) Mode opératoire :

- Prendre une certaine quantité de sol sur le tamisât du tamis de 2mm ;
- Mettre l'échantillon à l'étuve pour séchage. Après refroidissement à l'air ambiant, écraser les agglomérats de particules au pilon dans un mortier et prélever une quantité constituante m₀ ;
- Introduire le sol dans le pycnomètre et éliminer toute particule qui aurait adhéré sur sa surface extérieure ;
- Remplir le pycnomètre avec de l'eau distillée en s'assurant de l'élimination complète de toutes les bulles d'air accrochées aux particules (par dépression) ;
- Remplir le pycnomètre muni de son bouchon jusqu'au trait de jauge et puis peser. Soit m₁ la deuxième masse ;
- Vider le pycnomètre de tout son contenu, puis le remplir de nouveau seulement avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et enfin le peser une troisième fois pour déterminer m₂.

d) Exploitation des résultats

La masse volumique absolue est alors déterminée par la formule II.4 :

$$\rho_S = \frac{\rho_w \cdot m_1}{m_0 - m_3} \quad \text{(II.4)}$$

Où $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ et $m_2 = m_1 + m_3$

Avec :

- m₁ : la masse du sol ;
- m₂: la masse du sol et de l'eau distillée ;
- m₀ : la masse de l'eau distillée ;

- ρ_w : masse volumique de l'eau.

II.4.3 Analyse granulométrique

Ce point présente le but de l'essai, le principe, quelques définitions ainsi que la description de l'essai d'analyse granulométrique.

a) But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers.

b) Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

c) Définitions

Pour les besoins du présent travail, les définitions suivantes s'appliquent :

- Prise d'essai : matériau soumis à l'essai.
- Analyse granulométrique par tamisage : ensemble d'opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.
- ✓ Dimension nominale d'ouverture d'un tamis « d » : dimension caractéristique de la maille carrée de côté d.
- ✓ Refus sur un tamis : partie du matériau retenu sur un tamis.
- ✓ Tamisât ou passant : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- ✓ Classe granulométrique : ensemble d'éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.
- ✓ Pourcentage massique de refus : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- ✓ Pourcentage massique d'un tamisât : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.

- ✓ Courbe granulométrique : représentation du pourcentage massique des différents tamisât en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.

L'analyse granulométrique s'effectue par :

- ❖ **Tamisage pour les grains de diamètre supérieur à 80micromètres.** L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus ou des différents tamisât sont rapportés à la masse initiale du matériau. Les résultats sont obtenus en pourcentage avec la formule II.5 :

$$\% = \frac{\text{poids du refus cumulé}}{\text{poids avant lavage}} \times 100 \quad \text{(II.5)}$$

- ❖ **Par sédimentométrie pour les grains plus fins.** L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. L'échantillon de sol est placé dans une colonne verticale de sédimentation qui contient un liquide de densité connue. La colonne est équipée d'un système de mesure optique qui permet de mesurer la hauteur de chaque fraction de particules dans la colonne à intervalles réguliers de temps. La distribution de tailles de particules est ensuite calculée en fonction du temps nécessaire pour que chaque fraction se dépose.

Tamisât Refus ou granulométrie laser (*passant*)

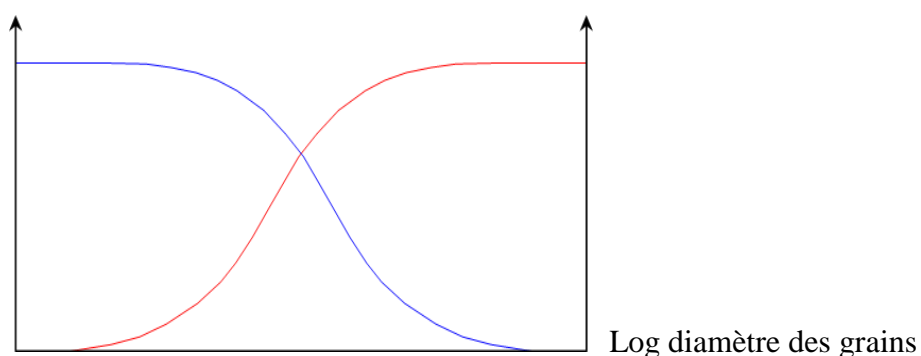


Figure-II-5 : Courbe de distribution massique des grains [9]

Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie sont présentés sous forme de courbe granulométrique qui montre la distribution des tailles de particules dans l'échantillon.

d) Description de l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NF P 94-056 [21]. L'essai s'effectue par la détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique ; le lavage de l'échantillon qui est immergé dans l'eau pendant 24 heures.

L'échantillon humide avec éventuellement les eaux de trempage, est versé sur un ou plusieurs tamis de décharge et le refus est récupéré et séché jusqu'à masse constante et cela pour chaque tamis utilisé. On procède aussi au tamisage en versant le matériau lavé et séché dans la colonne constituée par l'emboîtement des tamis, les tamis étant classés de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes. On agite manuellement ou mécaniquement la colonne et enfin on verse le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur. Enfin de compte, on pèse le refus maximum admissible sur chaque tamis.

Le matériau séché, de masse M, est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut. En partie inférieur, on dispose un tamis de 0.08mm sur montant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passent à travers ce tamis. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de variations de la tamiseuse.

e) Mode opératoire

L'essai d'analyse granulométrique est réalisé selon la norme NF P 94-056 [21], qui consiste à :

- ✓ Prélever une certaine quantité de matériau (environ 2000g) et la mettre à l'étuve pendant 24 heures à une température avoisinant le 105°C ;
- ✓ Après refroidissement, écraser les mottes qu'elle peut contenir au pilon dans le mortier ;
- ✓ Passer au lavage de matériau sur le tamis de 80 μ m à l'étuve pendant 24 heures à une température variante entre 105°C et 110°C ;
- ✓ Effectuer le tamisage sur les différents tamis disposés par ordre de grandeur décroissant puis peser les refus obtenus pour chaque tamis ;
- ✓ Tracer un graphique qui représente la répartition des grains en pourcentage selon les diamètres des différents tamis utilisés.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât étant rapportés à la masse initiale de matériau, le pourcentage est ainsi obtenu à partir de la formule II.5. Les résultats obtenus sont reportés sur un graphique.

Courbe granulométrique → représentation graphique donnant :

- ✓ La masse de tamisât cumulé (en %) : échelle arithmétique
- ✓ Le diamètre des particules : échelle logarithmique

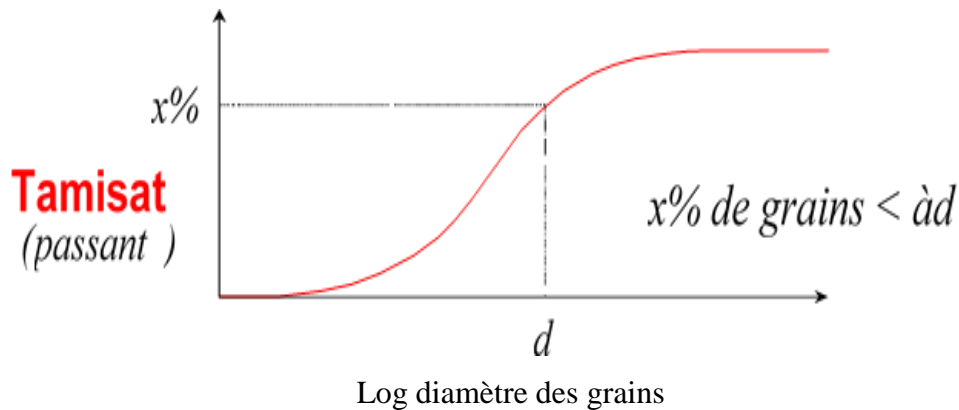


Figure-II-6 : Courbe de l'analyse granulométrique [9]

La granularité, c'est la répartition de la dimension moyenne des particules du sol exprimé en pourcentage de la masse totale du matériau. Elle s'exprime par la courbe granulométrique tracée dans un diagramme semi-logarithmique. Ce diagramme porte : en abscisse le logarithme des diamètres de particules, et en ordonnée le pourcentage en masse du matériau total de la fraction du sol dont les particules ont un diamètre moyen inférieur à celui repéré par l'abscisse correspondant. En d'autres termes, on porte en ordonnée ce que l'on appelle tamisât ou passants. On peut noter quelques dimensions importantes des particules :

- ✓ Le diamètre effectif D_{10} c'est celui correspondant à l'ordonnée 10%
- ✓ Le diamètre effectif D_{60} c'est celui correspondant à l'ordonnée 60%
- ✓ Le diamètre effectif D_{30} c'est celui correspondant à l'ordonnée 30%

Si C_u est inférieur ou égal à 2, la granulométrie est dite *serrée* ; si C_u est supérieur à 2, la granulométrie est dite *étalée*.

Caractérisation de la granulométrie d'un sol → utilisation de coefficients :

- ✓ **Coefficient d'uniformité : elle est déterminée par la relation II.6**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (II.6)$$

$C_u > 4$ → granulométrie uniforme étalée

$C_u < 4$ → granulométrie uniforme ou serrée

- ✓ **Coefficient de courbure : elle est déterminée par la relation II.7**

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (II.7)$$

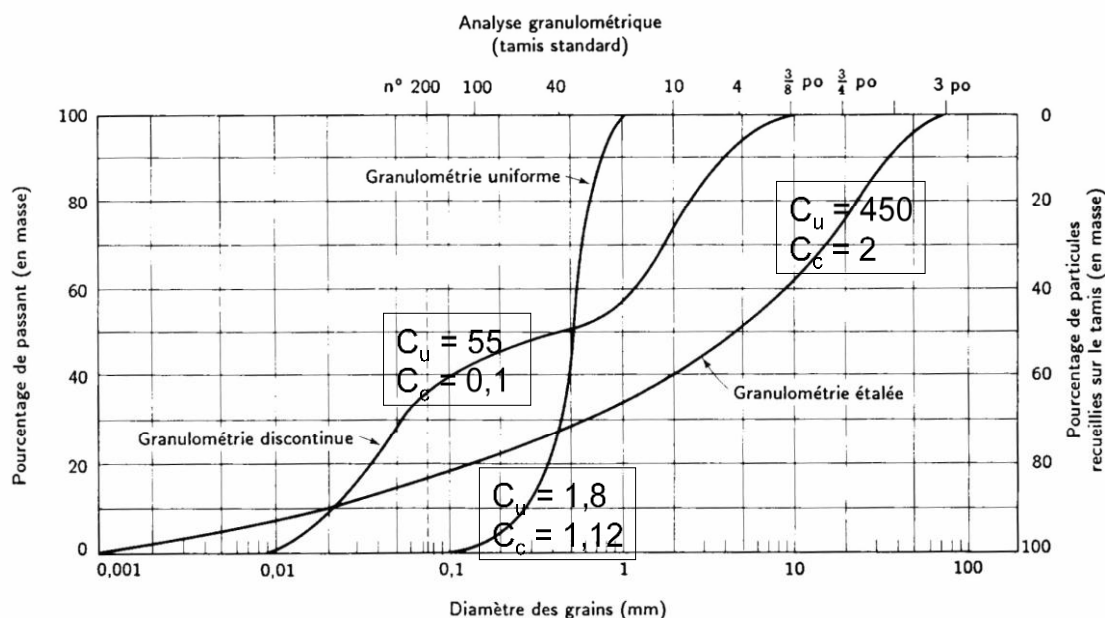
Sols bien gradués → matériaux plus denses

Classification du sol selon le coefficient de courbure : lorsque la valeur du coefficient de courbure se situe entre 1 et 3 et que le coefficient d'uniformité est supérieur à 4 pour le gravier et à 6 pour le sable, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Dans un tel cas, on dit que *la granulométrie est bien graduée*.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure dépasse 3, la courbe granulométrique commence à prendre la forme d'un creux orienté vers le bas ; plus la valeur augmente, plus le creux s'accroît. Si cette valeur est inférieure à 1, le creux de la courbure s'oriente plutôt vers le haut. Un coefficient de courbure trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} : *la granulométrie est alors mal graduée*.

Suivant la forme de la courbe granulométrique, on parle de granularité uniforme ou étalée, ainsi que de la granularité continue ou discontinue. La forme de la courbe granulométrique est liée notamment au mode de formation des sols.

A partir de l'analyse granulométrique, on détermine également le module de finesse d'un sable qui est la somme des pourcentages des refus cumulés ramenés à l'unité pour les tamis des mailles 5 ; 2,5 ; 1,25 ; 0,63 ; 0,315 et 0,16 mm.



Figur-II-7 : Graphique de l'analyse granulométrique [9]

f) Exploitation des résultats

On présente les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisats cumulés sous la forme d'une courbe appelée courbe granulométrique dans laquelle les ouvertures des tamis sont portées en abscisse, sur une échelle logarithmique et les pourcentages en ordonnée sur une échelle arithmétique et l'analyse granulométrique est déterminée par la relation II.5 :

$$\% = \frac{\text{poids du refus cumulé}}{\text{poids avant lavage}} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

II.4.4 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des paramètres qui permettent de caractériser l'état de consistance des sols fins en fonction de leur teneur en eau. Elles sont essentielles pour l'identification et la classification géotechnique des sols [9]. Deux de ces limites attireront notre intérêt dans cette partie : la limite de liquidité et la limite de plasticité. Une limite d'Atterberg correspond à la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe d'une consistance à une autre.

II.4.4.1. Limite de liquidité

La limite de liquidité caractérise le passage du sol de l'état plastique à l'état liquide. C'est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

Le but de cet essai est de déterminer la teneur en eau d'un échantillon à son passage de l'état liquide à l'état plastique. L'essai consiste à déterminer le nombre de coups à la coupelle de Casagrande permettant de refermer d'environ 10mm les deux lèvres de la rainure et de déterminer la teneur en eau correspondant au nombre de coups. On répète l'opération cinq fois et on trace la droite de la limite de liquidité appelée courbe d'écoulement représentant la teneur en eau en fonction du nombre des coups. La limite de liquidité est ainsi obtenue à partir de cette droite et correspond à la teneur en eau avec 25 coups à la coupelle de Casagrande [10].

La limite de liquidité a été déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande suivant, la norme NF P 94-051 [22].

a) Matériels et appareillages

- ✓ Un plateau pouvant contenir tout le matériau après lavage ;
- ✓ Un tamis de 0,4mm pour le lavage ;
- ✓ Une pipette d'eau ;
- ✓ Un appareil de Casagrande avec tous ses accessoires ;
- ✓ Un bac pour le malaxage ;
- ✓ Une étuve pour la détermination de la teneur en eau ;

- ✓ Une balance ;
- ✓ Des tares.

b) Mode opératoire

➤ Préparation de l'échantillon

Après échantillonnage, l'échantillon réservé aux limites est lavé à l'eau au tamis de 0,4mm. Seules les particules passantes à ce tamis sont recueillies et retenues pour l'essai. Une quantité d'environ 80g de tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte presque liquide. Avec une spatule, on met la pâte dans une coupole propre et sèche. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'emprisonner les bulles d'air.

➤ Exécution de l'essais

La limite de liquidité est mesurée et réalisée à l'aide d'un appareil appelé appareil de **Casagrande** selon le procédé ci-après :

- ✓ L'échantillon est mis en place à la spatule de façon bien homogène, l'épaisseur au centre est de 15 à 20mm, le pourtour étant sensiblement horizontal ;
- ✓ À l'aide de l'outil à rainurer, on creuse une rainure dans le mortier suivant l'axe de la coupole, l'outil étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci ;
- ✓ On tourne la manivelle de manière très régulière en raison de 2chocs par seconde et on observe le fond de la rainure en comptant le nombre de chocs nécessaires pour que celle-ci se renferme sur 1cm environ.
- ✓ L'opération est reprise 4 à 5fois avec des teneurs en eau décroissantes et de telle sorte que le nombre des chocs à chaque essai soit compris entre 15 et 40. Si le nombre des chocs n est inférieur à 15, on laisse sécher un peu ; s'il est supérieur à 40, on humidifie légèrement et on homogénéise bien le sol avant de reprendre l'essai.

Ainsi donc, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25chocs.

Pour chaque essai avec $15 \leq \text{nombre de coups} \leq 40$, on détermine la teneur en eau tel que décrit précédemment.

c) Exploitation des résultats

- ✓ La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique et la teneur en eau w, mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant,

- ✓ La limite de liquidité est la teneur en eau lue sur le graphique pour $N=25$ coups. Elle s'exprime en pourcentage arrondi au nombre entier le plus proche.

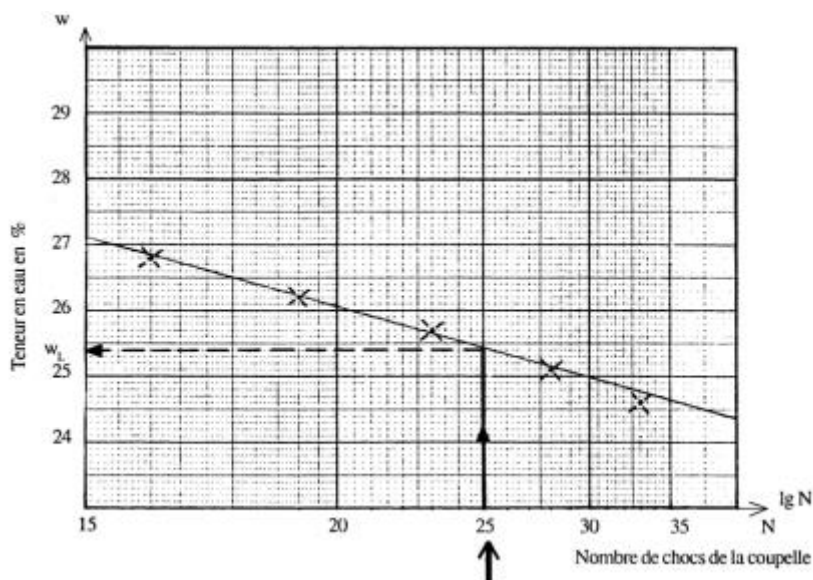


Figure-II-8 : Exemple de représentation de $w = f(\log N)$. Détermination de WL [9]

II.4.4.2. Limite de plasticité

La limite de plasticité est la teneur en eau à partir de laquelle un échantillon de sol cesse d'être malléable. C'est la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe de la consistance plastique à la consistance semi-solide à mesure qu'il sèche ou de la consistance semi-solide à la consistance plastique à mesure qu'il s'imprègne d'eau.

Elle est déterminée de la manière suivante :

- On pétrit une boulette de mortier grosse comme une noisette (environ 12mm de diamètre) et on fait un cylindre en le roulant sur une plaque de marbre propre, lisse et sèche.
- On effectue un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde et on confectionne à la main un cylindre de 3mm.
- Si ce dernier se brise avant d'atteindre ce diamètre, la teneur en eau est trop faible. S'il ne se brise pas, il est soulevé en son milieu à une hauteur de 15 à 20cm.
- La limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement. Si la rupture ne se produit pas, on laisse la teneur en eau diminuer. Lorsqu'il a été probant, l'essai est réalisé une deuxième fois.

- Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2% de la valeur moyenne. La limite de plasticité représente le seuil inférieur de l'état plastique. Un petit supplément d'eau au-dessus de la limite de plasticité détruira la cohésion du sol.

II.4.4.3. Indices déductibles des limites d'Atterberg

Dans cette partie, nous parlerons de la Limite de liquidité, de la Limite de Plasticité, de l'Indice de plasticité, Indice de liquidité et Indice de consistance.

Indice de plasticité

A partir des limites de liquidité et de plasticité, on détermine l'indice de plasticité. C'est la différence numérique de la limite de liquidité et de plasticité. L'indice de plasticité exprime la plage de plasticité d'un sol. Elle est déterminée par la relation II.8

$$I_P = W_L - W_P \quad \text{(II.8)}$$

Avec :

- ✓ I_P : Indice de plasticité ;
- ✓ W_L : Limite de liquidité ;
- ✓ W_P : Limite de plasticité.

Plus l'indice de plasticité est élevé, plus grande est la zone dans laquelle le sol est à l'état plastique, et plus ce sol contient de l'argile. Cet indice est déterminé suivant la norme NF P 94-057 et permet de classer les sols suivant l'échelle ci-dessous :

IP	Type de sol
$0 < I_P < 5$	sol non plastique
$5 < I_P < 15$	sol peu plastique
$15 < I_P < 40$	sol plastique
$I_P > 40$	sol très plastique

Indice de liquidité

L'indice de liquidité permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi solide ou solide. Plus il est élevé, plus l'argile est proche de l'état liquide et plus elle est dangereuse. Il est déterminé par la relation II.9 :

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} \quad \text{(II.9)}$$

Où :

- ✓ I_L : Indice de liquidité ;
- ✓ W : la teneur en eau naturelle du sol
- ✓ W_P : la limite de plasticité
- ✓ I_P : l'indice de plasticité.

I_L	Etat du sol
$Si I_L < 0$	sol à l'état solide ou semi-solide
$0 < I_L < 1$	sol à l'état plastique
$I_L > 1$	sol à l'état liquide

Indice de consistance

L'indice de consistance correspond à l'écart entre le limite de liquidité et la teneur en eau naturelle sur l'indice de plasticité. Il est déterminé par la relation II.10 ci-après :

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- ✓ W_L : la limite de liquidité,
- ✓ W_p : la teneur en eau naturel,
- ✓ I_p : l'indice de plasticité.

Le résultat trouvé ici est analysé et interprété à l'échelle de classification des sols suivant les valeurs d' I_c présentées dans le tableau II.-1 :

Tableau II-1, ci-dessous présente l'Echelle de classification des sols suivant les valeurs de l'indice de consistance I_c .

Tableau II-1 : Indice de consistance [4]

I_c	0 à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 0,75	0,75 à 1
Etat	Plastique			
Consistance	Très molle	Molle	Très plastique	Plastique

II.5 ESSAIS DE CARACTÉRISATION MECANIQUE DES SOLS [23]

Parmi les essais de caractérisation mécanique des sols, nous pouvons citer l'essai Proctor et l'essai CBR. Ils sont utilisés pour déterminer respectivement la teneur en eau optimale et l'indice CBR.

Le comportement mécanique du sol est caractérisé par des paramètres qui permettent d'évaluer les déformations qu'il subit sous différentes sollicitations et d'estimer sa capacité à supporter

les charges. Ce sont les tassements, la compressibilité ou la consolidation, la résistance au cisaillement du sol, la densité maximale, la portance, etc.

II.5.1 Essai Proctor [10]

L'essai Proctor est déterminé par les normes NF P 94-093, ASTM 1557-91, ISRM D 698-91&98 et a pour but de déterminer, pour un sol donné, pour un mode de compactage et une énergie de compactage donnés, l'évolution de la masse volumique finale du sol sec en fonction de la teneur en eau. Il a donc pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de compactage donné et les conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore la capacité portante maximale ; c'est-à-dire de connaître la masse volumique sèche ρ_d maximale et la teneur en eau W_{opt} correspondante appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

L'essai Proctor consiste à compacter le matériau de sol dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et ce à cinq teneurs en eau différentes. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%,4%,6%,8%,10%,12%,14%,16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximale ».

La teneur en eau optimale et la densité sèche optimale sont obtenues suivant la norme NF P 94-093 [24] à l'aide de l'essai Proctor modifié. La teneur en eau optimale est obtenue à la teneur à laquelle la densité sèche a commencé à diminuer.

a) But de l'essai

L'essai Proctor a pour but d'identifier les conditions idéales (en termes d'humidité) sous lesquelles un sol doit être compacté afin d'obtenir sa densité sèche maximale. La teneur en eau est ainsi déterminée et appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

b) Matériels et appareillage

- ✓ Le moule Proctor constitué d'un tube cylindrique métallique inoxydable pourvu d'un fond et d'une hausse métallique ;
- ✓ La dame Proctor ;
- ✓ Une étuve ;
- ✓ Une règle à araser ;
- ✓ Truelles pour malaxer ;

- ✓ Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage ;
- ✓ Une balance ;
- ✓ Une éprouvette graduée ;
- ✓ De l'eau ;
- ✓ Des bacs.

c) Principe de l'essai

L'essai Proctor consiste à compacter un échantillon de sol dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus précis.

Plusieurs essais sont effectués avec des échantillons humidifiés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor » et l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».

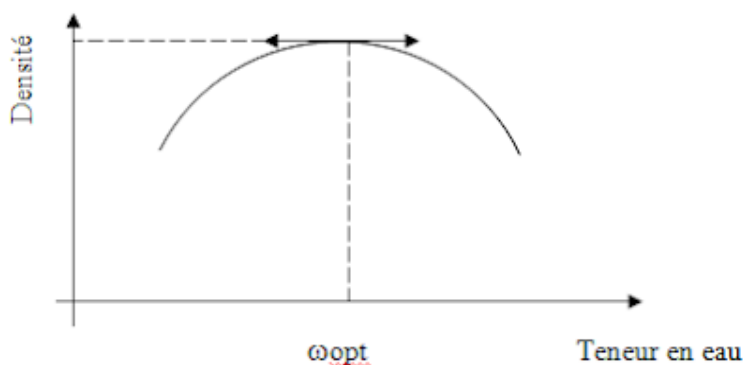


Figure II-9 : Diagramme Proctor simple [9]

d) Mode opératoire

- ✓ Prendre environ 6kg de sol ayant des diamètres inférieurs à 20mm ;
- ✓ Y verser une quantité d'eau de départ soit par exemple 2% de 6kg et cela est pris en fonction de la teneur en eau naturelle du sol et de l'état de l'échantillon ;
- ✓ Malaxer le mélange jusqu'à l'homogénéisation de ce dernier ;
- ✓ Remplir le moule Proctor normalisé en 5 couches et à chaque couche, on compacte à l'aide d'une dame Proctor en 55 coups par couche ;
- ✓ Une fois le moule rempli, on arase avec la règle à araser, on comble les vides laissés à la surface ;

- ✓ On prélève un échantillon de sol du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2^e échantillon d'à peu près du même poids ;
- ✓ A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on les met à l'étuve pendant 24 heures pour obtenir la teneur en eau.

Les résultats obtenus sont inscrits dans un tableau. L'essai est répété plusieurs fois de suite (en principe 5 fois si on a une phase descendante de la courbe) sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14 %, 16%).

II.5.2 Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'essai C.B.R (California Bearing Ratio) est un essai de portance c'est-à-dire qui a pour but de déterminer l'aptitude des matériaux à supporter les charges dans les conditions les plus défavorables.

a) Définitions

- ✓ **Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat** : grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.
- ✓ **Indice CBR portant immédiat** : grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantier.
- ✓ **CBR immersion(4jours)** : valeur obtenue par l'essai, proportionnelle à l'effort à appliquer pour obtenir un enfoncement donné dans les conditions de teneur en eau les plus défavorables. Il est aussi appelé simplement indice CBR.

b) Principe de l'essai

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces appliquées sur un poinçon cylindrique pour les faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette des matériaux.

Les valeurs particulières de deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs de forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur exprimée en pourcentage des 2 rapports ainsi calculés.

Notons que les indices CBR et IPI (Indice Portant Immédiat) ne constituent pas les caractéristiques intrinsèques d'un sol. En effet, si ces grandeurs dépendent en partie de la nature du sol (granularité, plasticité), elles dépendent davantage de sa teneur en eau, de sa masse

volumique sèche et de son degré de saturation qui sont les caractéristiques d'état, celles-ci étant fonction des conditions de mise en œuvre et d'environnement.

Pour ce qui concerne l'indice CBR de dimensionnement d'une chaussée, le concepteur doit choisir les caractéristiques d'état du sol qu'il attend prendre en considération en fonction des particularités du projet. A titre indicatif, on peut rappeler que les caractéristiques suivantes sont souvent retenues :

- ✓ La teneur en eau optimale ;
- ✓ La densité sèche maximale ;
- ✓ L'état de saturation : celui obtenu après 4 jours d'immersion. Pour ce qui concerne l'indice de portance immédiat ;
- ✓ La teneur en eau pour laquelle on veut évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins ;
- ✓ La masse volumique du sol correspondant à la valeur obtenue lorsqu'on compacte le matériau à la teneur en eau considérée, à l'énergie Proctor normal dans le cas d'un sol et à l'énergie Proctor modifié dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.

c) But de l'essai

L'essai CBR a pour but de déterminer un indice permettant de calculer grâce à des abaques l'épaisseur des couches de fondation d'une route nécessaires à la constitution d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu prévus et des conditions hydriques futures que subira cette route. Il est déterminé pour des sols à vocation routière de manière purement empirique. L'Indice Portant Californien est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau à étudier d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part. Il caractérise implicitement la tenue au poinçonnement d'un sol.

d) Matériels et Appareillage

➤ Matériels de confection des éprouvettes

Il comprend :

- ✓ Le moule CBR
- ✓ Le dame ou machine de compactage Proctor normal et Proctor modifié
- ✓ L'ensemble des accessoires (plaque de base, RIOS, disque d'espacement, règle à araser)

- ✓ Les matériels d'usage courant (balance, étuve, bac, etc.) L'ensemble du matériel est décrit dans la norme NFP94/093.

➤ **Matériels de poinçonnement**

Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50KN et possédant une course d'au moins 10mm. Cette presse doit être équipée :

- ✓ D'un poinçon cylindrique en acier ;
- ✓ D'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de 1,27mm/minute ;
- ✓ D'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0,1mm ;
- ✓ D'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement

➤ **Matériels de mise en immersion et de gonflement des matériaux**

On a :

- ✓ Le bac d'immersion,
- ✓ Le comparateur,
- ✓ Un disque de gonflement.

e) Mode opératoire ou exécution de l'essai

➤ **Confection des éprouvettes**

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de condition d'état du sol (teneur en eau, masse volumique, état de saturation, etc.) pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20mm, l'intégralité du sol est soumise à l'essai. Si le sol contient des éléments de dimension supérieure à 20mm, il faut tamiser.

Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer 5,5kg minimum des matériaux dans le cas où on recherche l'indice CBR d'immersion. On procède ensuite à la préparation du sol et compactage dans le moule.

➤ **Compactage et imbibition**

- ✓ Préparation du moule en veillant à ce qu'il soit propre et en bon état. On pèse le tout à 5g près ensuite on place le disque d'espacement ;
- ✓ Ensuite, on introduit le matériau selon le processus de l'essai Proctor modifié en 5 couches successives d'égale l'épaisseur qui sont chacune compactée avec la même dame Proctor modifié selon les énergies de compactage différentes qui sont en général 10, 25 et 55 coups. Le but est d'obtenir 3 moulages ayant nettement des compacités différentes ;
- ✓ Une fois le compactage terminé, la hausse doit dépasser le moule d'environ 1cm. On arase soigneusement puis on enlève le fond qu'on veut fixer sur la face supérieure du moule. Après avoir placé un papier filtre à la surface de l'échantillon, on retourne le moule, on retire le disque d'espacement ensuite après avoir placé un papier filtre sur cette face, on pèse à 5g près ;
- ✓ Si le sol doit être essayé sans imbibition, on procède directement au poinçonnement. Sinon, on place le disque perforé de gonflement à la surface de l'échantillon puis on dispose une charge annulaire sur le disque. Le moule ainsi chargé est placé dans un bas rempli d'eau de telle sorte que l'eau arrive librement par-dessous et par-dessus l'échantillon ;
- ✓ On place le trépied porte-comparateur en s'assurant que les pieds portent bien sur les bords du moule. On fixe le comparateur au trépied, on règle la hauteur de la tige du plateau de gonflement de sorte que le palpeur du comparateur vienne reposer sur l'extrémité de cette tige. On note alors la lecture du comparateur (lecture initiale) ;
- ✓ On laisse le moule à imbibition normale pendant 4jours dans l'eau ;
- ✓ Le délai écoulé, on note le gonflement lu au comparateur, on enlève les surcharges et le plateau de gonflement et on le porte sous la presse de poinçonnement.

➤ **Exécution du poinçonnement**

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine l'IPI, l'Indice CBR immédiat ou l'Indice CBR d'immersion.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI, placer l'ensemble embase moule éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante :

- ✓ Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;

- ✓ Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;
- ✓ Etablir la courbe effort-déformation correspondant au moins aux enfoncements de 2,25mm, 2mm, 2,5mm, 5mm, 7,5mm et 10mm.
- ✓ Déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'Indice CBR immédiat :

- ✓ Interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement.
- ✓ S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6g de surcharge ainsi constituée, il y'a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse.
- ✓ Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'Indice CBR d'immersion :

- ✓ Positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ;
- ✓ Mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ;
- ✓ Immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10mm de hauteur soit présente sous le moule.

Généralement, le poinçonnement se déroule de la manière ci-après :

- ✓ Le moule est placé sur le plateau de la presse et centré de telle sorte que le piston de poinçonnement soit bien dans le prolongement de l'axe du moule ;
- ✓ La tête du piston est amenée en contact avec la surface de l'échantillon en faisant monter le plateau de la presse. On remet alors les surcharges annulaires. La mise en place du piston de poinçonnement est achevée en manœuvrant lentement le volant de la presse jusqu'au moment où l'aiguille du comparateur de l'anneau dynamométrique commence à bouger. A ce moment, le piston est bien en contact avec la surface de l'échantillon. On fixe alors un comparateur au 1/100 de millimètre derrière le cadran de l'indicateur de cadence-comparateur qui coulisse le long d'une tige verticale solidaire du bâti de la presse fixée de manière à ce que la pointe du palpeur du comparateur vienne reposer sur le bord du moule. Le comparateur est amené à zéro puis l'indicateur de la cadence mis en marche ;
- ✓ L'opérateur se met alors au volant de la presse et commence le poinçonnement au moment où le rayon repère de l'indicateur de cadence vient se superposer à l'aiguille du

comparateur, il manœuvre lentement de façon à maintenir en coïncidence l'aiguille du comparateur et le rayon repère. En procédant de cette manière, le poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27mm/minute) ;

- ✓ Au cours de l'essai, on note les pressions lues sur l'anneau dynamométrique qui correspondent aux enfoncements suivants- 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4 - 4,5 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 et 10mm. On arrête alors l'essai lorsqu'on atteint ce dernier enfoncement.
- ✓ Pour les calculs, on s'intéresse aux valeurs des pressions trouvées aux enfoncements de 2,5 et 5 mm qu'on divise par 1000 ensuite on lit sur l'abaque les forces correspondantes.
- ✓ On considère le CBR pour 25 coups.

f) Expression des calculs

On calcule les valeurs présentées par les relations II.11 et II.12

$$\bullet \quad CBR_{2,5} = \frac{\text{Force appliquée } 2,5}{13,6} \times 100 \quad (\text{II.11})$$

$$\bullet \quad CBR_5 = \frac{\text{Force appliquée } 5}{20,3} \times 100 \quad (\text{II.12})$$

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs.

Avec :

- Force appliquée 2,5 : La force (en KN) à 2,5mm d'enfoncement ;
- Force appliquée 5 : La force (en KN) à 5mm d'enfoncement ;
- 13,6 : Forces (en KN) à 2,5mm d'enfoncement pour le matériau de référence ;
- 20,3 : Forces (en KN) à 5mm d'enfoncement pour le matériau de référence.

Les tableaux II-2 et II-3 présentent la classification de portance du sol selon le pourcentage de son CBR ainsi que l'utilisation des sols selon sa classe.

Tableau II-2 Pourcentage de CBR et sa classe de portance [8]

Classe de portance	Valeur de CBR (%)
S0 Portance très faible	CBR < 3
S1 Portance faible	3 < CBR < 6
S2 Portance moyenne	6 < CBR < 12
S3 Portance élevée	12 < CBR < 25
S4 Portance très élevée	CBR > 25

Tableau II-3 : CBR selon l'utilisation des sols

USE OF MATERIALS ACCORDING TO THEIR CBR (DEGN, 1987) [25]

Range of CBR	Use in road construction
S1: 0 < CBR < 5	Not suitable for road construction
S2: 5 < CBR < 10	Sub-base layer
S3: 10 < CBR < 15	Sub-base layer and backfill
S4: 15 < CBR < 30	Fondation layer for a traffic T1
S5: 30 < CBR < 60	Fondation layer for trafic T2/T3 and base layer for trafic T1
S6 : 60 < CBR < 120	Fondation layer for trafic T3/T4 and base layer for trafic T2
S7 : CBR > 120	Base layer trafic T3

II.5.3 Analyse du gonflement linéaire (Post-CBR) [26] [25]

L'évaluation de la susceptibilité au gonflement est une étape cruciale de l'essai CBR. Elle permet de mesurer l'instabilité volumétrique du matériau lorsqu'il est soumis à une immersion totale pendant une période de 96 heures (4jours).

a) Méthodologie de calcul

Le gonflement est exprimé en pourcentage par rapport à la hauteur initiale de l'échantillon. Il est déterminé par la variation de la hauteur mesurée à l'aide d'un comparateur de précision monté sur le moule.

Le calcul du pourcentage de gonflement s'effectue selon la formule II.13 :

$$\text{Gonflement } \% = \frac{\Delta H}{H_{ei}} * 100 \quad (\text{II.13})$$

Où les paramètres sont définis comme suit :

- ΔH (Variation totale de hauteur) : Elle représente l'aptitude du mouvement vertical enregistré par le comparateur. Le calcul prend en compte la lecture combinée des aiguilles de l'appareil :

$$\Delta H = (\text{Variation petite aiguille}) + (\text{Variation grande aiguille} * 0.01)$$

Note : Les coefficients de multiplication dépend de la sensibilité du comparateur utilisé (généralement exprimée en mm)

- **H_{ei} (Hauteur initiale de l'échantillon)** : c'est la hauteur effective du sol dans le moule avant l'immersion. Elle est obtenue par la différence entre la hauteur totale du moule et l'espace occupé par les disques de surcharge.

b) Exploitation des résultats

L'analyse du gonflement est déterminante pour la classification du sol et son futur comportement sous la chaussée. Selon les normes usuelles (notamment les guides techniques du GTR), l'interprétation se base généralement sur les seuils suivants :

- Gonflement < 1% : Le sol est considéré comme stable et peu sensible à l'eau. Il est favorable pour une utilisation en remblai ou en couche de forme.
- Gonflement entre 1% et 2% : Le sol est moyennement expansif. Des précautions de drainage ou de traitement peuvent être nécessaires.
- Gonflement > 2% : Le sol est très expansif. Il présente un risque élevé de soulèvement et de fissuration pour les structures de chaussée. Son utilisation nécessite souvent un traitement spécifique ou une substitution.

II.6 CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a présenté le milieu d'étude ainsi que les matériels et méthodes utilisés au laboratoire de Génie Civil de l'ULPGL afin de déterminer les caractéristiques géotechniques des sols du gisement de Bugarula à Idjwi. Les essais effectués consistent à l'identification et la caractérisation mécanique des sols de cette carrière.

Chaque essai est exécuté selon une norme. La teneur en eau naturelle a été déterminée suivant la norme NF 94-049, l'analyse granulométrique a été effectuée par voie humide selon la norme NF P 94-056 en vue de connaître la distribution granulométrique des sols ; l'essai des limites d'Atterberg nous a permis de déterminer l'état de consistance des sols selon la norme GTR et LCPC, l'essai Proctor modifié nous a permis de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale selon la norme NF P 94-093 et l'essai CBR selon la norme NFP 94-

078 nous a permis de déterminer la portance des matériaux c'est-à-dire l'aptitude des matériaux à supporter les charges dans les conditions les plus défavorables.

Le chapitre suivant aura comme objectif de présenter et d'interpréter les résultats obtenus des différents essais effectués au laboratoire sur ces sols.

Chapitre III. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS

III.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats issus des différents essais de laboratoire réalisés sur les échantillons de sol prélevés dans le gisement de Bugarula, situé sur l'île d'Idjwi. Il synthétise les données obtenues à partir de la détermination de la teneur en eau naturelle, de la masse volumique apparente, de la masse volumique absolue, de l'analyse granulométrique, des limites d'Atterberg, de l'essai Proctor ainsi que de l'essai CBR.

L'ensemble de ces essais a été effectué au laboratoire de Génie civil de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées de l'ULPGL/Goma. À l'issue de l'identification et de la caractérisation géotechnique des sols du gisement de Bugarula, une classification des sols a été réalisée afin d'évaluer leur aptitude et leur potentiel d'utilisation dans les travaux de construction routière.

III.2 CARACTÉRISTIQUES DE SOLS DE BUGARULA À L'ÉTAT NATUREL

Les résultats obtenus au cours des essais ont permis de déterminer les principaux paramètres d'état des sols étudiés. L'interprétation des résultats relatifs à la teneur en eau naturelle, aux masses volumiques, à la granulométrie et aux limites d'Atterberg a été faite conformément aux normes et recommandations techniques en vigueur afin d'apprécier la qualité géotechnique des matériaux étudiés.

III.2.1 Paramètres d'état

Les paramètres d'état de sols du gisement de Bugarula à Idjwi sont présentés dans le Tableau III-1.

Tableau III-1: Valeurs obtenues sur les différents paramètres d'état des sols de Bugarula

Paramètres	Unités	Valeurs BUG1	Valeurs BUG2	Valeurs BUG3	Valeurs Moyenne
Teneur en eau naturelle	%	7,85	12,22	9,79	9,95
Masse volumique apparente	g/m ³	1,35	1,45	1,43	1,41

Masse volumique absolue	g/m ³	2,57	2,70	2,46	2,57
-------------------------	------------------	------	------	------	------

Au vu des résultats présentés dans le tableau III.1., les sols du gisement de Bugarula présentent des teneurs en eau naturelle comprises entre 7,85% et 12,22%, reflétant les conditions locales de prélèvement. Leur masse volumique apparente moyenne de 1,41 traduit un état relativement peu compact [27], ce qui peut réduire la résistance mécanique et augmenter la déformabilité des sols lors d'une utilisation en construction. La masse volumique absolue de 2,57 indique une composition silico-argileuse classique, caractéristique des sols minéraux courants.

III.2.2 Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique des sols a été effectuée sur des échantillons de dimension supérieure à 0.08mm de diamètre après lavage et élimination des fines et ce, selon la norme NF P 94-056. Cet essai a été réalisé dans le but de déterminer en poids la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. Les analyses granulométriques des sols du gisement de Bugarula à Idjwi ont été réalisées par voie humide. Elles sont représentées sur les figures III-1, III-2 et III-3 selon les valeurs trouvées et représentées dans les tableaux en annexes 1, 2 et 3.

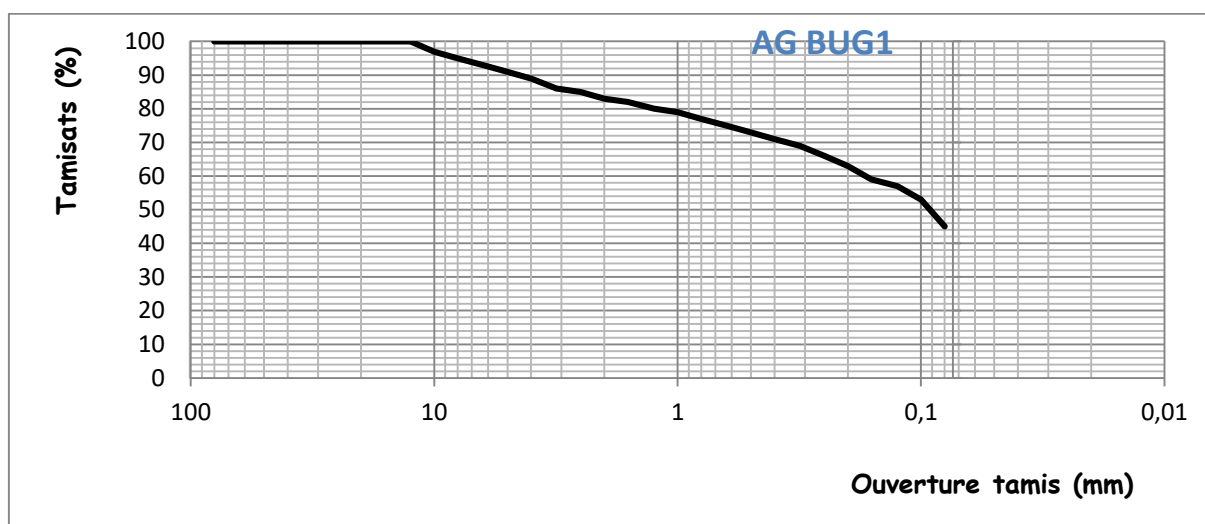


Figure III-1 : Analyse Granulométrique BUG1

La courbe III-1, montre que le pourcentage des fines est de 45% c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Suivant la classification des sols GTR, représentée dans le tableau 1-8, Il en découle que le sol BUG1 du gisement de Bugarula appartient à la classe des sols fins. Cette proportion de fines modérée suggère que le sol peut être compacté pour obtenir

une couche de fondation stable. Toutefois, la présence notable de particules fines rend le sol sensible à l'humidité, ce qui nécessite un contrôle rigoureux de l'eau lors du compactage et de la mise en œuvre. Cette courbe a été obtenue grâce au tamisage de l'échantillon de sol de Bugarula BUG1 dans le laboratoire de génie civil à l'ULGL/GOMA elle présente une discontinuité dépendant de la granulométrie du sable ; raison pour laquelle il est impossible d'évaluer C_u et C_c à cause de la valeur non définie D_{10} , D_{30} et D_{60} .

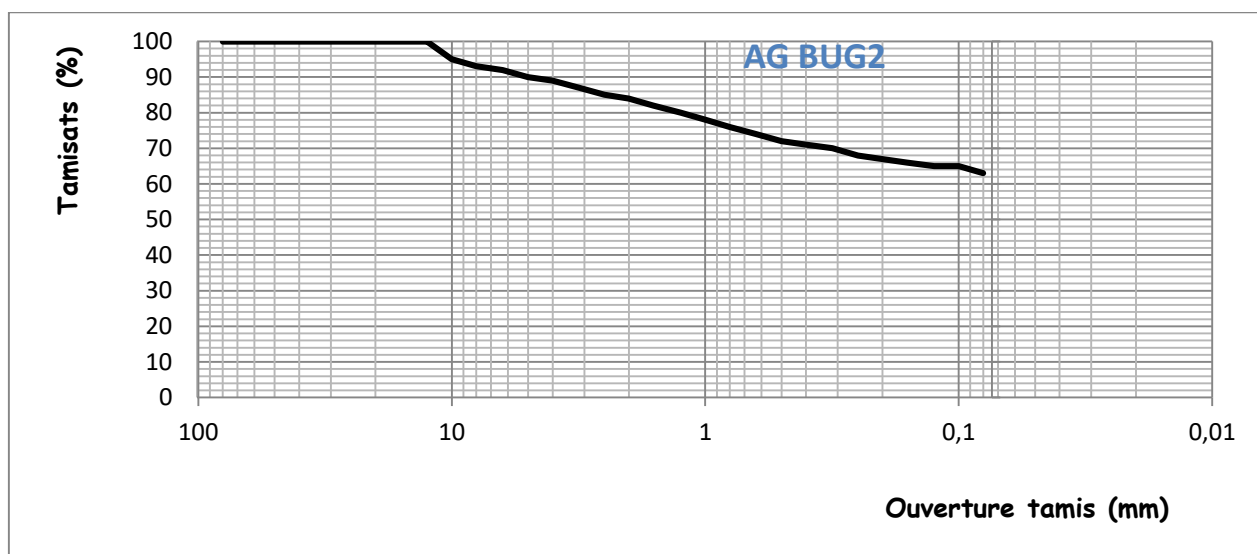


Figure III-2 Analyse Granulométrique BUG2

La courbe III-2 montre que le pourcentage des fines est de 63%, c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Suivant la classification des sols GTR, représentée dans le tableau 1-8, Il en découle que le sol BUG2 de Bugarula appartient également à la classe des sols fins. Avec cette proportion élevée de fines, ce sol est très sensible à l'eau et pourrait présenter des problèmes de gonflement ou de retrait sous des variations d'humidité. Il est donc nécessaire de stabiliser ou contrôler strictement l'humidité lors de son utilisation dans la construction routière pour garantir la durabilité et la portance de la chaussée. De même cette courbe a été obtenue grâce au tamisage de l'échantillon de sol de Bugarula BUG2 dans le laboratoire de génie civil à l'ULGL/GOMA, elle présente aussi une discontinuité dépendant de la granulométrie du sable ; raison pour laquelle il est impossible d'évaluer C_u et C_c à cause de la valeur non définie D_{10} , D_{30} et D_{60} .

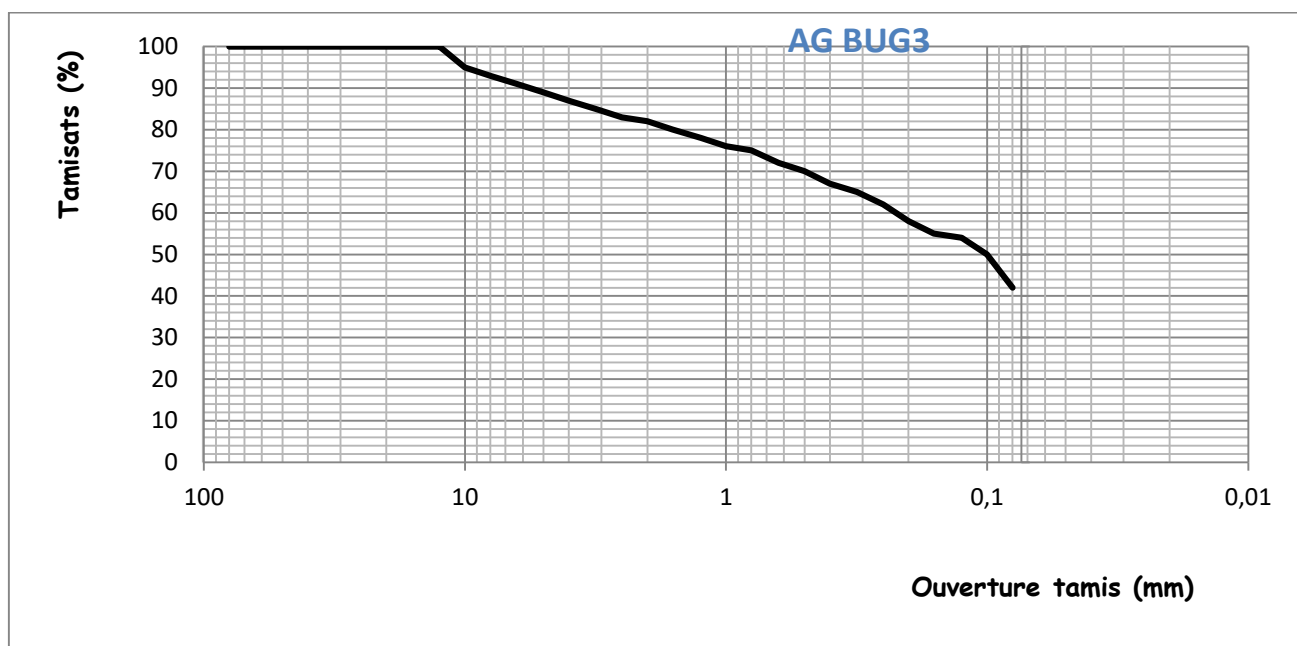


Figure III-3 Analyse Granulométrique BUG3

La courbe III-3 montre que le pourcentage des fines est de 42% pour BUG3, c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Suivant la classification des sols GTR, représentée dans le tableau 1-8, Il en découle que le sol BUG3 de Bugarula appartient aussi à la classe des sols fins. La proportion des fines étant légèrement inférieure à BUG1 et BUG2 indique que ce sol est moins sensible à l'humidité. Il peut être utilisé comme matériau de fondation ou de couche de base, avec un compactage adapté et un suivi de l'humidité pour éviter toute déformation. Cette courbe, ayant été obtenue grâce au tamisage de l'échantillon de sol de Bugarula BUG3 dans le laboratoire de génie civil à l'ULGL/GOMA, présente également une discontinuité dépendant de la granulométrie du sable ; raison pour laquelle il est impossible d'évaluer C_u et C_c à cause de la valeur non définie D_{10} , D_{30} et D_{60} .

III.2.3 Limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg a été effectuée sur des échantillons passant à travers le tamis de 0,4mm selon la norme NF P 94-051.

Les tableaux en annexe 4, 5 et 6 présentent les limites d'Atterberg des sols du gisement de Bugarula, illustrés par ces figures III-4, III-5 et III-6 qui montrent les Limites de Liquidité correspondant à 25 coups sur la coupelle de Casagrande:

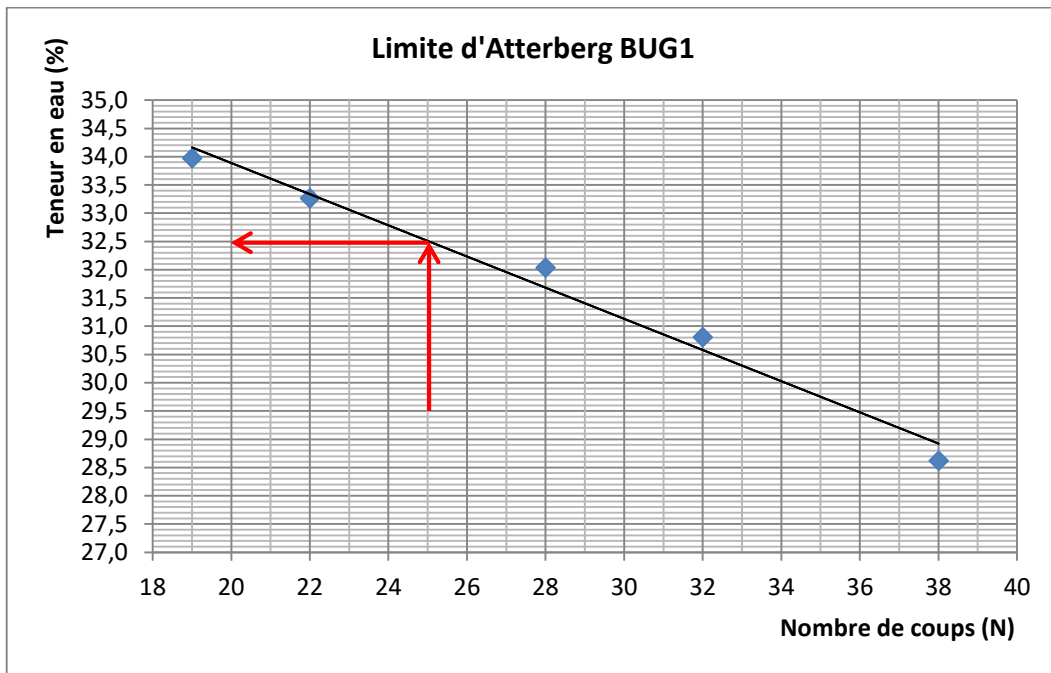


Figure III-4 Limite d'Atterberg BUG1

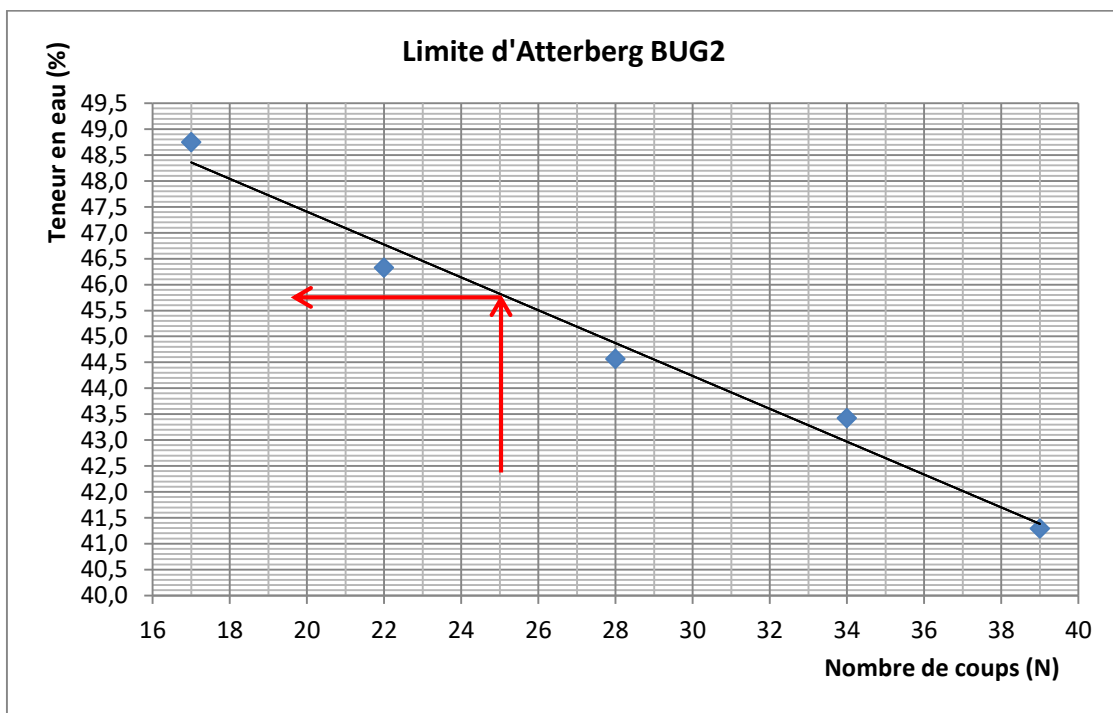


Figure III-5 Limites d'Atterberg BUG2

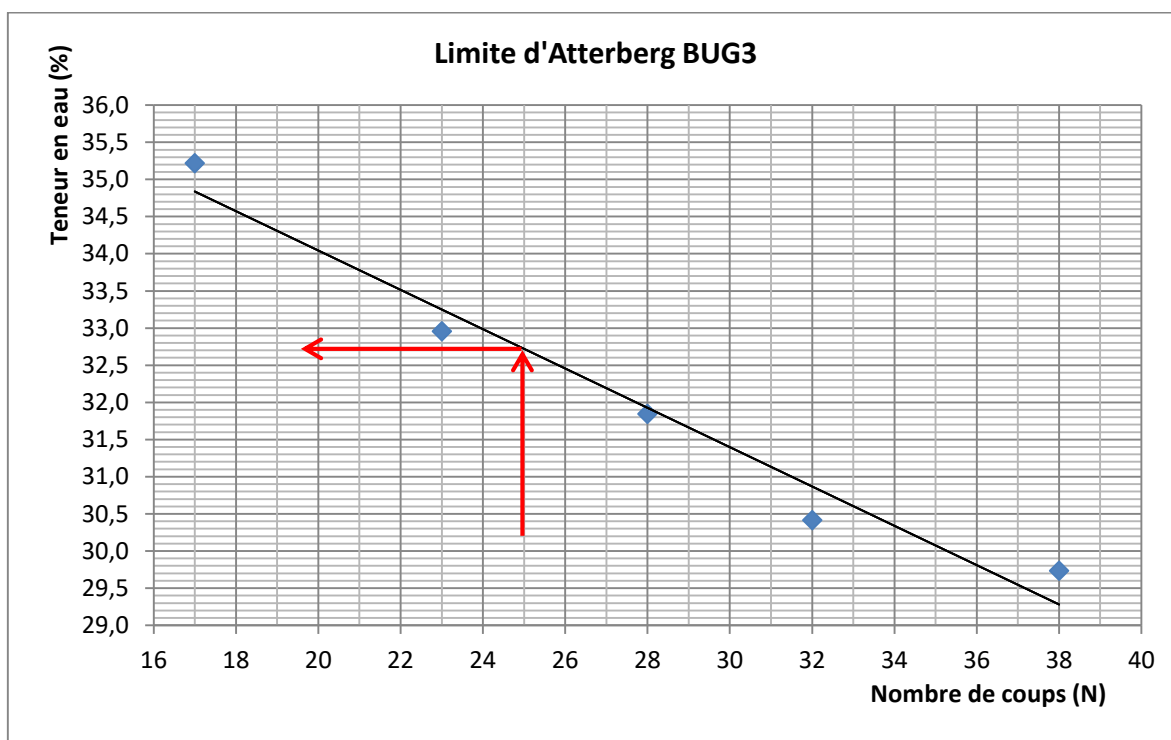


Figure III-6 Limite d'Atterberg BUG3

De ces figures III-4, III-5 et III-6, le Tableau III-2 est déduit représentant les différentes valeurs obtenues de Limites d'Atterberg pour les 3 échantillons.

Tableau III-2 : Limites d'Atterberg des sols de Bugarula

Échantillon	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	Indice de liquidité	Indice de consistance
BUG1	31,7%	NP	≈0%	ND	ND
BUG2	44,9%	24,7%	20,2%	-0,62%	1,62%
BUG3	32,0	NP	≈0%	ND	ND

D'après le Tableau III-2, Les résultats des essais des limites d'Atterberg montrent que les sols du gisement de Bugarula présentent une variabilité du comportement plastique. Les échantillons BUG1 et BUG3 n'ont pas de limite de plasticité mesurable, conduisant à un indice de plasticité pratiquement nul ($IP \approx 0\%$). Cette caractéristique peut correspondre soit à un sol fin de nature limoneuse, faiblement ou non plastique, soit à un sol grossier non cohérent, de type sableux ou graveleux. Le diagramme de Casagrande permettra de confirmer cette classification en positionnant le sol par rapport aux domaines de référence définis pour les sols

fins. Ces sols sont peu sensibles aux variations d'humidité et présentent une bonne stabilité à l'état naturel, ce qui les rend favorables pour la construction routière, notamment pour les couches de fondation et de base, sous réserve d'un compactage approprié.

L'échantillon BUG2, en revanche, présente une plasticité modérée, avec un indice de plasticité de 20,2 %, traduisant un sol de nature argileuse. Les valeurs de l'indice de liquidité négatif et de l'indice de consistance supérieur à 1 indiquent que ce sol est solide et très ferme à l'état naturel. Cependant, sa sensibilité à l'humidité impose un contrôle strict de la teneur en eau et un compactage adéquat lors de sa mise en œuvre afin d'assurer la durabilité de la chaussée.

III.2.4 Classification des sols de Bugarula selon le diagramme de Casagrande

La figure III-3 présente la classification des sols du gisement de Bugarula selon le diagramme de Casagrande.

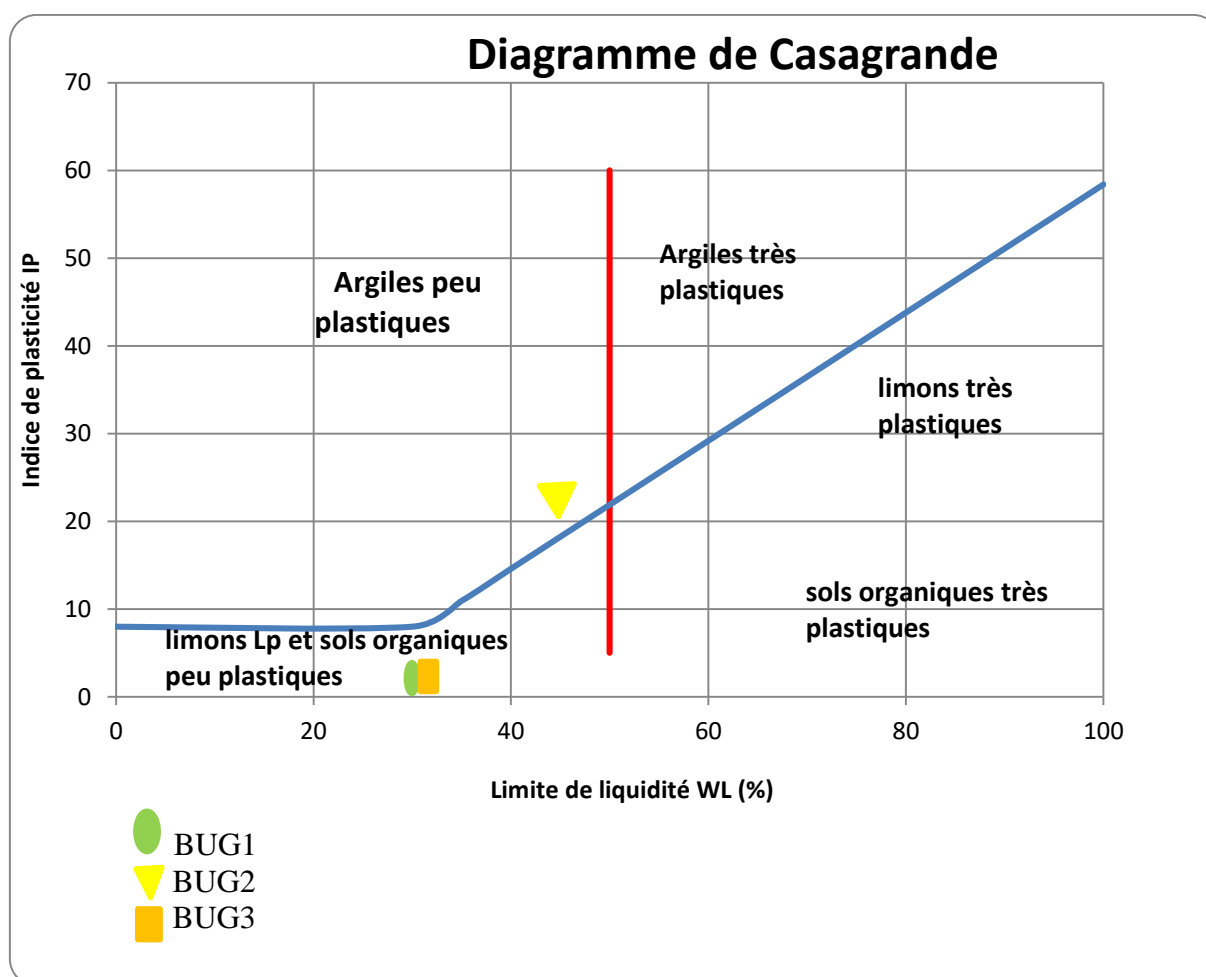


Figure III-7 Diagramme de Casagrande des sols de Bugarula

D'après la figure III-7, les trois échantillons du gisement de Bugarula se situent dans les domaines des sols fins faiblement plastiques : les échantillons BUG1 et BUG3 correspondent à des limons peu plastiques, tandis que BUG2 est une argile peu plastique présentant une plasticité faible à modérée.

Cette classification indique que ces sols ont une stabilité relative face aux variations d'humidité et une déformabilité limitée, ce qui constitue un facteur favorable pour leur utilisation en construction routière, notamment dans les couches de fondation ou de forme.

III.3 CARATÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS

Les résultats des essais mécaniques (Proctor et CBR) ont été déterminés respectivement suivant les normes NF P 94-093 et NF P 94-078.

III.3.1 Proctor Modifié

Les figures III-8, III-9 et III-10 présentent les courbes Proctor des sols du gisement de Bugarula à Idjwi.

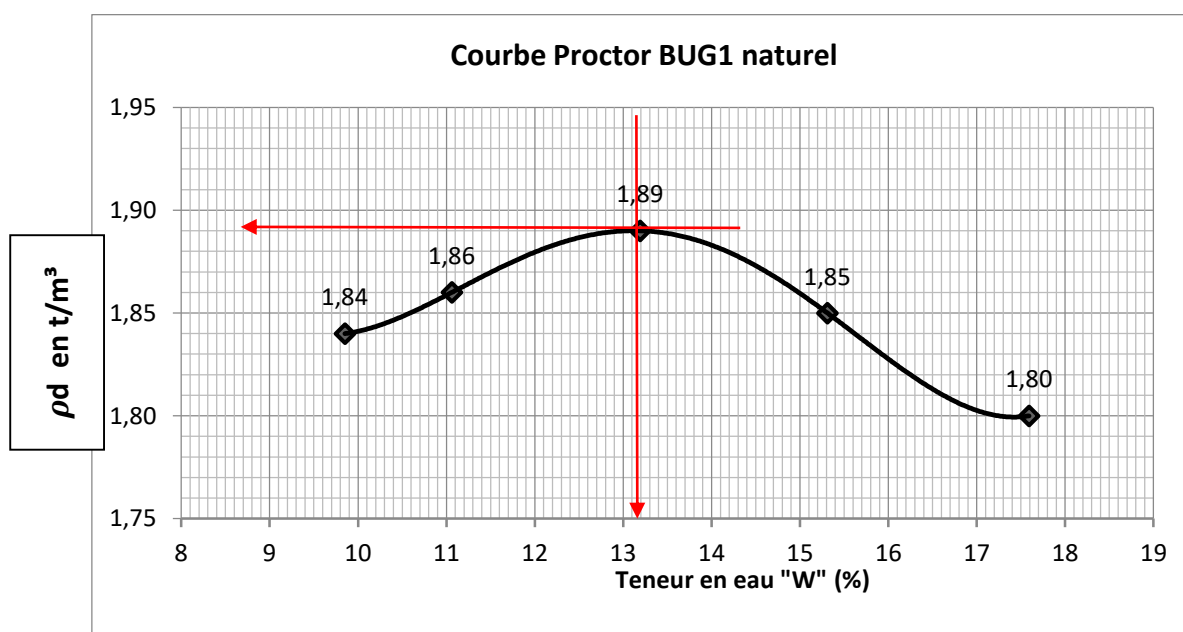


Figure III-8 Proctor Modifié BUG1

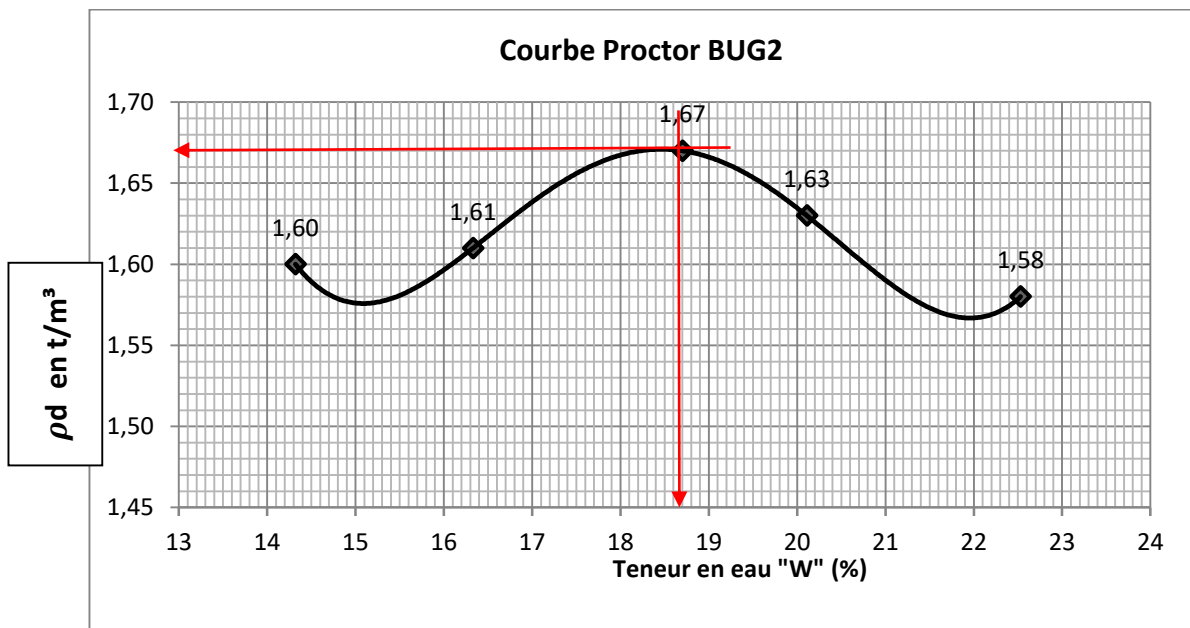


Figure III-9 : Proctor Modifié BUG2

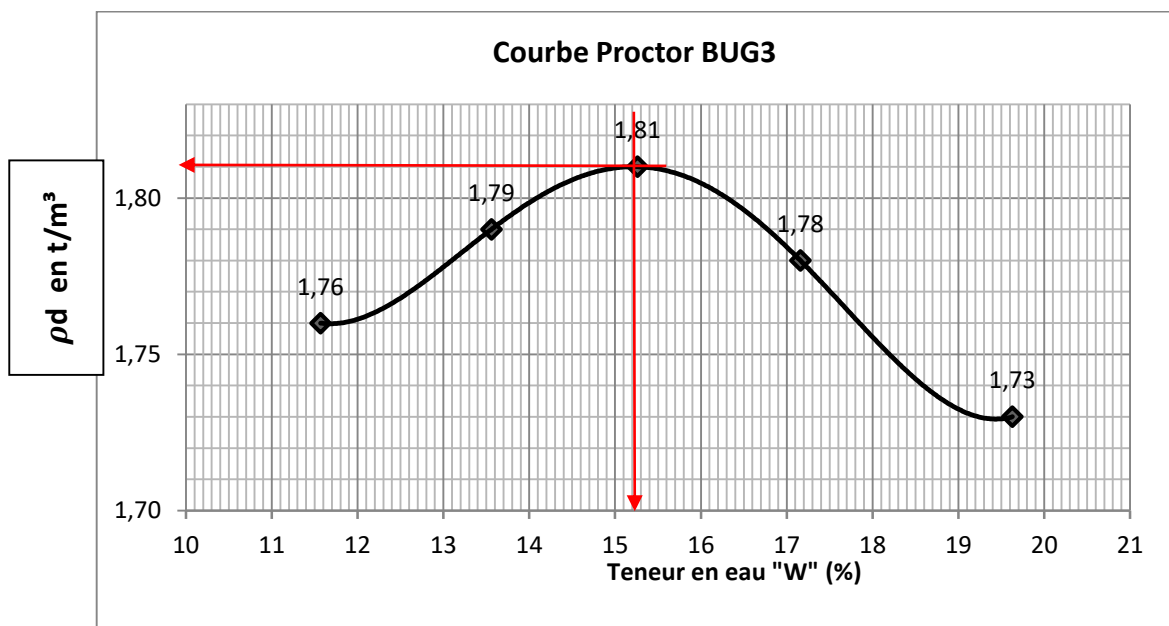


Figure III-10 : Proctor Modifié BUG3

De ces 3 figures (III-8, III-9 et III-10) est déduit le Tableau III-3 présentant les différentes valeurs des résultats obtenus lors de l'essai Proctor Modifié pour les 3 échantillons :

Tableau III-3 : Résultats du Proctor Modifié des sols de Bugarula

Échantillon	Densité sèche maximale ρ_{dmax} (t/m ³)	Teneur en eau optimale w_{opt} (%)
BUG1	1,89	13,2
BUG2	1,67	18,7
BUG3	1,81	15,26

D'après le tableau III-3, Les résultats de l'essai Proctor Modifié montrent que les sols du gisement de Bugarula présentent des comportements de compactage variés.

BUG1 atteint une densité sèche maximale élevée (1,89 t/m³) avec une teneur en eau optimale modérée (13,2 %), indiquant qu'il peut être compacté efficacement pour former une couche de fondation stable, à condition de contrôler précisément la teneur en eau lors du compactage.

BUG2 présente la densité sèche maximale la plus faible (1,67 t/m³) et la teneur en eau optimale la plus élevée (18,6 %), ce qui montre que ce sol est moins compactable et plus sensible aux variations d'humidité, limitant son utilisation directe en construction routière. Un compactage soigneux et un contrôle rigoureux de l'humidité seront nécessaires pour garantir la stabilité de la chaussée.

BUG3, avec une densité sèche maximale intermédiaire (1,81 t/m³) et une teneur en eau optimale raisonnable (15,3 %), peut être compacté efficacement, offrant une bonne stabilité pour la construction routière sous réserve d'un compactage correct.

III.3.2 CBR California Bearing Ratio (Indice portant Californien)

L'essai CBR, après quatre jours d'immersion, nous a permis de déterminer les portances des sols étudiés. Les résultats de cet essai sont présentés dans les Tableaux III-4, III-5 et III-6 ainsi que dans les annexes 10, 11 et 12.

Tableau III-4 : L'indice de Portance du sol BUG1.

Nombres des coups	Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
25	CBR2, 5	$\frac{0,65}{13,6} \times 100$	3,2%
	CBR 5	$\frac{1,96}{20,3} \times 100$	9,65%

Tableau III-5 : L'indice de Portance du sol BUG2.

Nombres des coups	Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
25	CBR 2,5	$\frac{0,43}{13,6} \times 100$	3,16%
	CBR 5	$\frac{0,87}{20,3} \times 100$	4,28%

Tableau III-6 : L'indice de Portance du sol BUG3.

Nombres des coups	Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
25	CBR 2, 5	$\frac{0,22}{13,6} \times 100$	1,61 %
	CBR 5	$\frac{0,43}{20,3} \times 100$	2,11%

De ces 3 tableaux, l'indice CBR élevé après 4 jours d'immersion (pour celui de 25 coups) étant pour 5mm d'enfoncement, est égal à 9,65% pour le sol BUG1 ; à 4,28 % pour BUG2 et à 2,11% pour BUG3.

D'après le tableau en annexe 14, on peut dire que les sols du gisement de Bugarula appartiennent à la classe de portance S2 correspondant à la portance moyenne pour BUG1, et à la classe de portance S1 correspondant à la portance faible pour BUG2 et à la classe de portance S0 correspondant à la classe de portance très faible pour BUG3. De même pour le tableau "USE OF MATERIALS ACCORDING TO THEIR CBR (DEGN, 1987)" en annexe 13 montre que le CBR du gisement de Bugarula à Idjwi est dans l'intervalle de $5 < \text{CBR} < 10$ pour BUG1 il est donc adapté pour la sub-base layer (couche de fondation inférieure) dans une structure de chaussée routière ; et dans l'intervalle de $0 < \text{CBR} < 5$ pour BUG2 et BUG3 où il est non adapté à la construction routière.

III.3.3 Gonflement linéaire (post-CBR)

Le tableau III-7 présente les résultats du gonflement, des sols du gisement de Bugarula, après prélèvement de la variation de petites et grandes aiguilles du jour 0 au jour 4.

Tableau III-7 : Gonflement linéaire (Post-CBR) des sols du gisement de Bugarula à Idjwi

Désignations	BUG1	BUG2	BUG3
Petite aiguille (mm)	0	2	3
Grande aiguille (mm)	0,95	0,45	0,71
ΔH (mm)	0,95	2,45	3,71
H_{ei} (mm)	134	134	134
Gonflement (%)	0,70	1,82	2,76

D'après les résultats du tableau III-7 le sol BUG1 a un gonflement faible soit 0,70%, il advient que ce sol est considéré comme stable et peu sensible à l'eau. Cela indique qu'il présente un risque minimal de soulèvement ou de fissuration, et qu'il peut être utilisé comme matériau de chaussée avec un compactage approprié. Le sol BUG2 a un gonflement moyen soit 1,82%, il advient que ce sol est considéré comme moyennement expansif. Il peut subir un gonflement significatif sous l'effet de l'eau, ce qui implique un risque moyen de déformation pour les structures routières. Et enfin le sol BUG3 a un gonflement élevé soit 2,76% et est donc très expansif et présentent un risque élevé de soulèvement et de fissuration des couches de chaussée. L'utilisation directe de ce sol sans traitement ou modification est fortement déconseillée.

III.4 CONFORMITÉ DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA AUX CONSTRUCTIONS ROUTIÈRES SELON LE CEBTP

III.4.1 Conformité de la granulométrie des sols au regard du fuseau CEBTP

Les figures III-11 et III-12 présentent les fuseaux de granulométrie de référence, utilisés pour apprécier la conformité des sols étudiés à travers la comparaison de leurs courbes de la granulométrie aux limites recommandées par le CEBTP, respectivement pour les couches de fondation et de base.

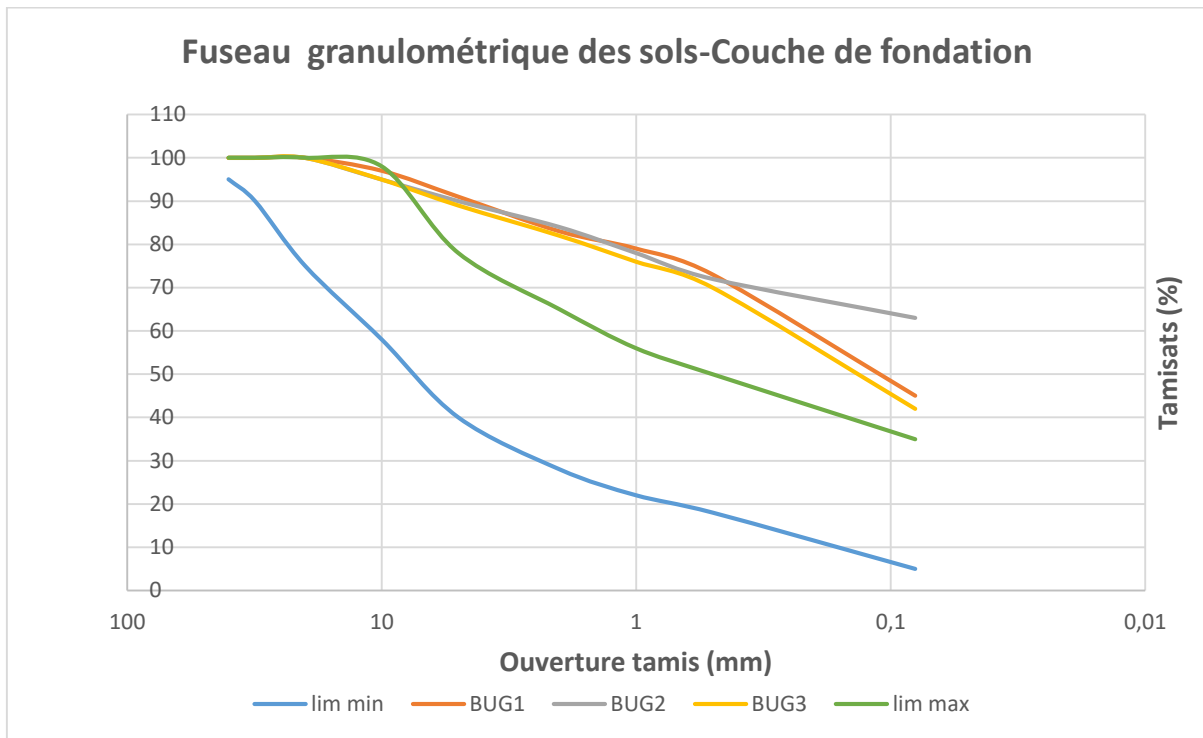


Figure III-11 : Fuseau granulométrique des sols de Bugarula en couche de fondation

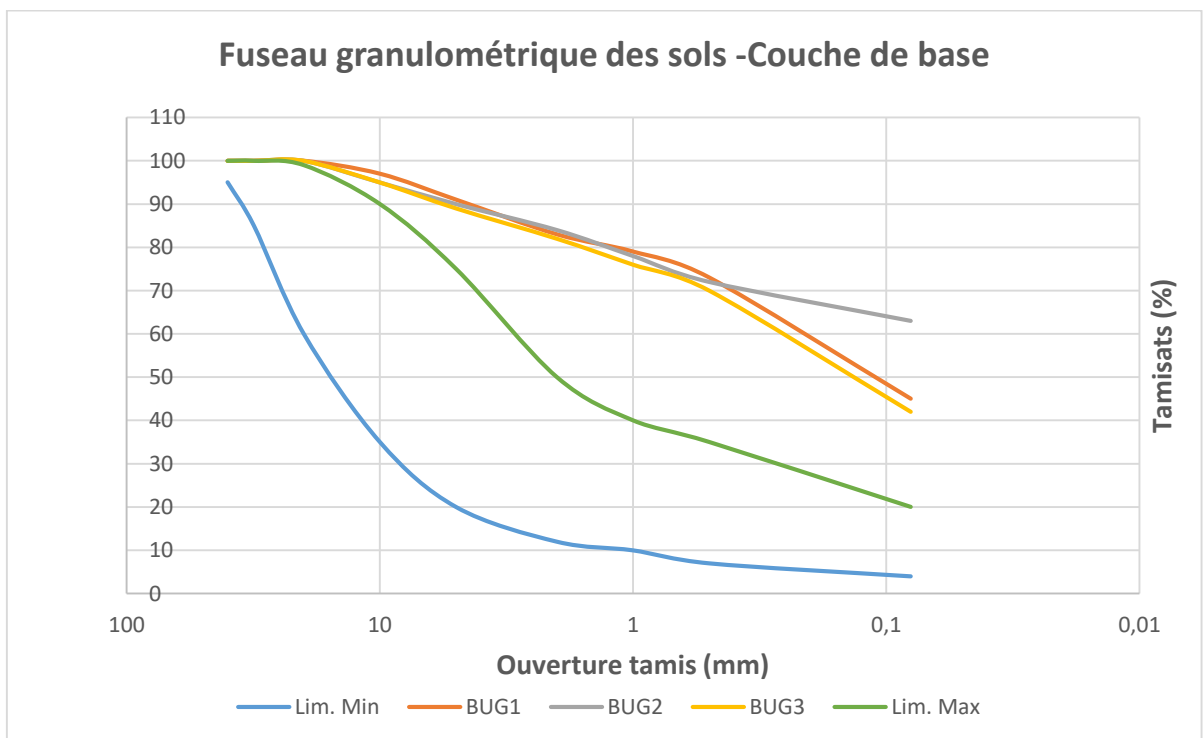


Figure III-12 : Fuseau granulométrique des sols de Bugarula en couche de base

D'après les figures III-11 et III-12, l'analyse granulométrique montre que les courbes des échantillons étudiés sortent du fuseau recommandé par le CEBTP, aussi bien pour la couche de fondation que pour la couche de base. Cette non-conformité traduit une granulométrie inadaptée à une utilisation directe en construction routière. Par conséquent, les sols du gisement de Bugarula ne peuvent pas être utilisés à l'état naturel sans un traitement ou amélioration préalable avant toute mise en œuvre.

III.4.2 Limite d'Atterberg avec les seuils CEBTP

La figure III-13 présente les limites d'Atterberg avec les seuils CEBTP.

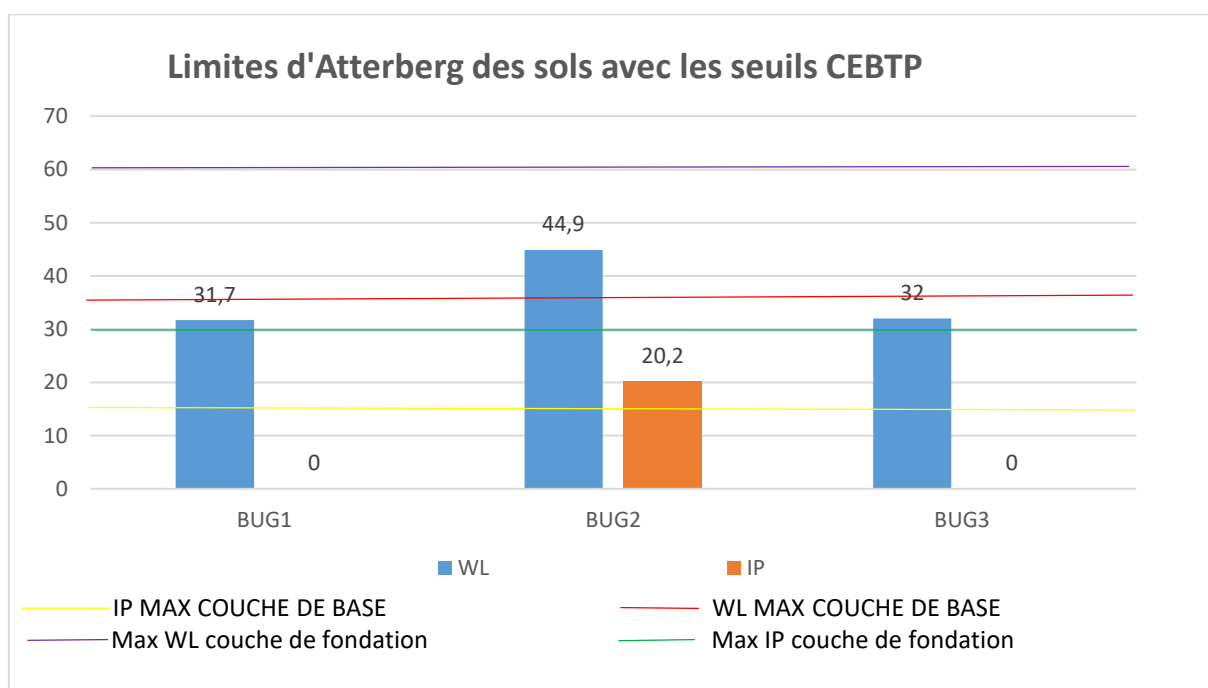


Figure III-13 : Limites d'Atterberg des sols de Bugarula avec les seuils CEBTP

D'après la figure III-13, la confrontation des résultats obtenus aux limites recommandées par le CEBTP montre que les sols BUG1 et BUG3 présentent des caractéristiques favorables aussi bien pour une utilisation en couche de fondation qu'en couche de base, du point de vue de la plasticité. En revanche, le sol BUG2, bien qu'acceptable en couche de fondation, présente une limite de liquidité et un indice de plasticité supérieure aux seuils admissibles pour une couche de base, traduisant une sensibilité plus marquée à l'eau. Ainsi, les sols du gisement de Bugarula présentent globalement une aptitude favorable à la construction routière sous réserve d'un contrôle du comportement mécanique.

III.4.3 CBR des sols avec les seuils CEBTP

Les résultats de CBR des sols du gisement de Bugarula avec les seuils CEBTP sont présentés par la figure III -14.

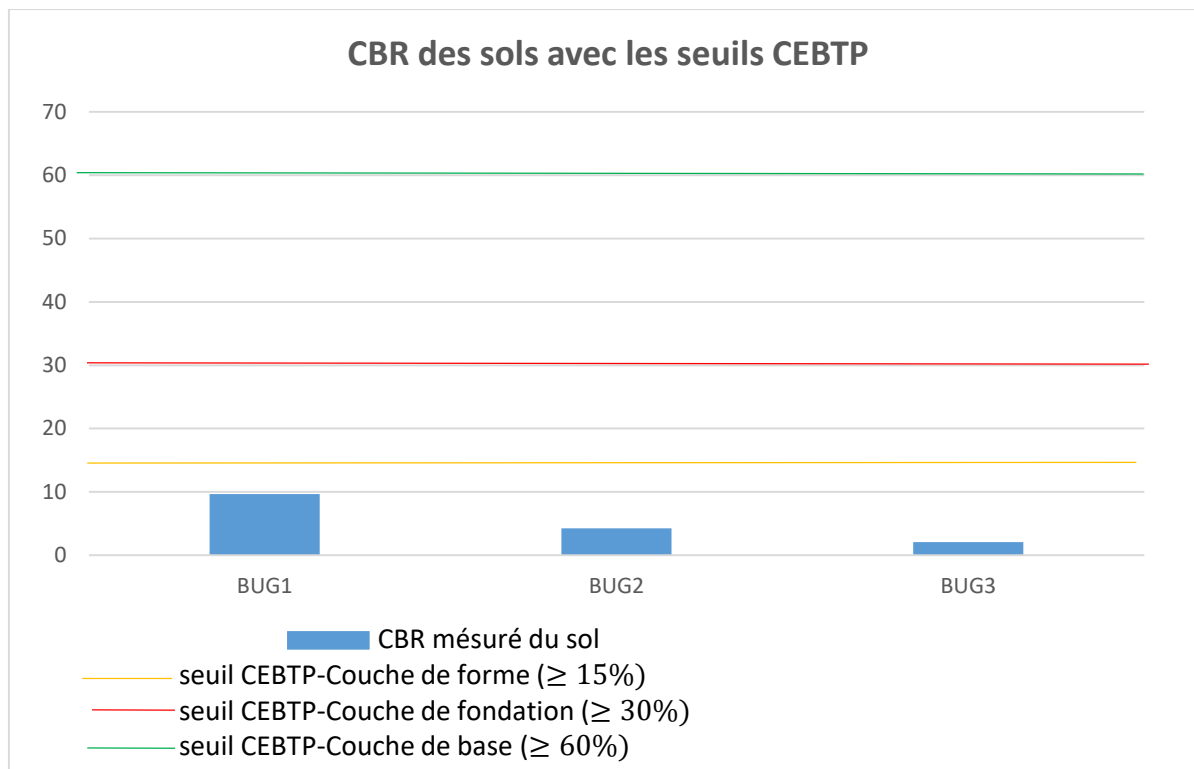


Figure III-14 : CBR des sols de Bugarula avec les seuils CEBTP

D'après la figure III-14, à l'état naturel, les trois échantillons des sols du gisement de Bugarula présentent de CBR inférieures aux seuils minimaux définis par le CEBTP pour les différentes couches de chaussée. Ils ne sont donc pas aptes à une utilisation dans la construction routière.

III.5 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a porté sur la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais effectués au laboratoire sur les sols du gisement de Bugarula à Idjwi.

Les résultats obtenus en se basant sur la classification GTR et LCPC ont permis de dire que les 3 échantillons des sols du gisement de Bugarula appartiennent à la classe des sols fins (% fines >35%, soit 45% pour BUG1, 63% pour BUG2 et 42% pour BUG3). S'agissant du type de sol en se basant sur le diagramme de Casagrande, les échantillons des sols BUG1 et BUG3 sont des limons peu plastiques tandis que BUG1 est une argile peu plastique. Mais aussi le sol de

BUG1 est caractérisé comme étant un sol de portance moyenne (CBR= 9,65%), le sol de BUG2 est caractérisé comme étant un sol de faible portance (CBR= 4,28%) et le sol de BUG3 est caractérisé comme étant un sol de portance très faible (CBR= 2,11%). S'agissant du gonflement, il a été trouvé que le sol BUG1 a un gonflement faible (Gonflement=0,70%), le sol de BUG2 a un gonflement moyen (Gonflement=1,82 %) et le sol de BUG3 a un gonflement élevé (Gonflement=2,76).

En effet, avec ces indices de portance, de manière générale selon LCPC, le sol de BUG1 peut être utilisé en couche de fondation inférieure dans une structure de chaussée routière. Cependant en se basant sur les critères de conformité aux recommandations du CEBTP, les indices CBR des sols de la carrière de Bugarula sont faibles et inférieurs aux seuils minimaux du CEBTP pour les différentes couches de chaussée, et donc ces sols ne peuvent pas être utilisés dans les constructions routières sans un traitement préalable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a porté sur la caractérisation géotechnique des sols du gisement de Bugarula, sur l'île d'Idjwi. L'objectif principal a été d'évaluer l'aptitude des sols du gisement de Bugarula à être utilisés comme matériaux de construction routière.

Les investigations ont porté sur trois échantillons représentatifs (BUG1, BUG2 et BUG3), et tous les essais ont été réalisés au laboratoire de Génie civil de l'ULPGL à Goma. Les résultats ont montré que les sols sont majoritairement fins, avec un pourcentage de fines supérieur à 35 %. La masse volumique absolue moyenne est de 2,57 g/cm³ et la masse volumique apparente moyenne de 1,41 g/cm³. La teneur en eau naturelle varie de 7,85 % pour BUG1 à 12,22 % pour BUG2 et 9,79 % pour BUG3, traduisant une humidité non négligeable au moment du prélèvement. L'analyse des limites d'Atterberg montre que BUG2 est une argile peu plastique modérée (indice de plasticité 20,2 %), tandis que BUG1 et BUG3 correspondent à des limons peu plastiques.

Les essais mécaniques ont mis en évidence des performances globalement faibles : le CBR après immersion est de 9,65 % pour BUG1 (portance moyenne), 4,28 % pour BUG2 (faible) et 2,11 % pour BUG3 (très faible), avec des gonflements allant de faible à élevé. Les faibles valeurs de CBR, toutes inférieures aux seuils recommandés par le CEBTP pour les couches de chaussée, ont confirmé que ces sols, à l'état naturel, ne possèdent pas une capacité portante suffisante pour une utilisation directe en construction routière. Le mauvais comportement mécanique observé s'explique tout d'abord par la forte teneur en fines favorisant une forte rétention d'eau et une diminution de la résistance mécanique, ensuite la plasticité observée, notamment pour BUG2, accentue la déformabilité du sol. À cela s'ajoute la faible masse volumique apparente mesurée, traduisant une structure peu compacte et une mauvaise transmission des charges, ce qui explique les faibles valeurs de CBR enregistrées.

Ainsi, à l'état naturel, les sols de Bugarula ne sont globalement pas adaptés à la construction routière. Néanmoins, la caractérisation réalisée constitue une base scientifique solide, utile pour guider les choix techniques et orienter des travaux futurs visant la valorisation ou l'amélioration de ces matériaux.

Le travail présente certaines limites : la reconnaissance géologique du site est incomplète, le nombre d'échantillons est restreint et les essais, bien que réalisés en laboratoire, peuvent différer légèrement du comportement réel des sols sur le terrain. Malgré ces limites, les conclusions restent fiables et pertinentes pour la planification technique.

Pour les recherches futures, il est recommandé de valoriser les sols en explorant des techniques de stabilisation ou de traitement adaptées afin d'améliorer la portance et de réduire le gonflement, de réaliser une reconnaissance géologique complète de la carrière, incluant des sondages systématiques, afin de mieux connaître la nature, l'étendue et la variabilité du gisement, d'évaluer la quantité et le volume disponibles de la carrière, ce qui permettra de projeter sa durée de service et planifier son exploitation de manière optimale, d'étudier en détail les caractéristiques chimiques et minéralogiques des sols pour identifier des solutions de traitement efficaces et optimiser leur comportement mécanique, de réaliser une étude appliquée sur un tronçon routier bien défini de l'île d'Idjwi, en proposant des mesures de dimensionnement des différentes couches de chaussée adaptées aux propriétés des sols et de compléter ces analyses par des essais in situ, afin de confirmer le comportement réel des sols sous conditions de terrain. Ces actions permettront de rendre exploitable le potentiel des sols de Bugarula tout en minimisant les risques pour la durabilité des infrastructures.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Institut National de la Statistique (INS-RDC), Monographie du territoire d'Idjwi, Kinshasa: Ministère du Plan, 2020.
- [2] G. Balegamire, «Etude de la dynamique spatiale et environnementale du territoire d'Idjwi,» Travail de fin de cycle UOB , Bukavu, 2022.
- [3] CEBTP, Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, Paris: La documentation Française, 1984.
- [4] N. Meibing, «Etude comparative des caractéristiques du sol par stabilisation au ciment et à la chaux : application au sol de Buganga à Minova,» Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Civil, Goma: ULPGL/Goma, 2020-2021.
- [5] N. Assea, «Etude de la valorisation des sols argileux en vue de leurs utilisations dans un projet routier : cas des sols de Katana au Sud-Kivu,» Memoire présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Civil/ULPGL, Goma, 2023.
- [6] E. Madaraka, «Etude de la stabilisation du sol de Bweremana en vue de son utilisation comme matériau de construction routière,» ULPGL, Goma, 2023.
- [7] LCPC-SETRA, Guide des Terrassements Routiers (GTR), Norme française NF P 11-300, Paris, France: Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, 1992.
- [8] A. C. Didier, «Renforcement des propriétés mécaniques des sols de nyakavogo par la chaux hydraulique,» Génie Civil ULPGL/GOMA,, Goma, 2017-2018.
- [9] N. François, Mécanique des sols et des roches, Notes de cours inédit, G3 Génie, GOMA: FSTA/ ULPGL-GOMA, 2021.
- [10] M. Kambale, «Etude de l'applicabilité des corrélations de Peltier et de Popovic sur les sols de Butuhe et de Komba : Application à la construction routière,» ULPGL, Goma, 2021-2022.
- [11] M. Duc, «Remarquables, les argiles dans le génie civil : pathologies et propriétés,» Université Paris est Marne La Vallée, Paris, 2020.
- [12] K. Belloulou, «Etude d'un glissement de terrain survenu sur la RN60 au 77+000 à Kser Boukhari.medea,» Juin 2014.

- [13] G. S. Winnie, «Contribution à la caractérisation des sols de Rutshuru en vue de l'utilisation comme matériau de remblai dans la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana,» ULPGL, Goma, 2023.
- [14] O. D. Routes, «Les listes de routes nationales,» 2015.
- [15] O. D. Routes, «Les routes nationales de République Démocratique du Congo,» 2013.
- [16] I. G. K. Djibril, *Cours de routes G3 génie civil*, Goma: ULPGL, 2022.
- [17] «Google earth,» [En ligne]. Available: https://earth.google.com/web/search/Idjwi+Island/@-2.07257259,29.14638027,1444.68035432a,91629.52770791d,35y,0.00010324h,0t,0r/data=CiwiJgokCTHqMQIFPwDAEVe9mBwRXgDAGelmoOQXFD1AIYfPbZ9UDj1AQgIIAUICCABKDQj_____8BEAA.
- [18] B. N. Elisha, «Etude géotechnique du sol de Bweremana en vue de son utilisation comme matériau de construction routière,» ULPGL, Goma, 2023.
- [19] AFNOR, NF P 94-050 : Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux, France, Septembre 1995.
- [20] AFNOR, NF P 94-054: sols: reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols- Méthode du pycnomètre à eau, France, Octobre 1991.
- [21] AFNOR, NF P 94-056 : Sols: reconnaissance et essais-Analyse granulométrique- Méthode par tamisage à sec après lavage, France, Mars 1996.
- [22] AFNOR, NF P 94-051: Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'atterberg, France, Mars 1993.
- [23] K. M. Elie, «Caractérisation du sol de Rubaya en vue de son utilisation comme matériau étanche : application aux installations de stockage de déchets (ISD) ;,» ULPGL, GOMA, 2019.
- [24] AFNOR, NF P 94-093, France, Octobre 2014.
- [25] AFNOR, NF P 94-078 : Sols: Reconnaissance et Essais-Indice CBR après immersion- Indice CBR Immédiat-Indice Portant immédiat-Mesure sur échantillon dans le moule CBR, France, Mai 1997.

- [26] LCPC; SETRA, Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique (GTR), 2000: ISTTAR, Paris, France.
- [27] Institute for Environmental Research and Education, «What is Soil Bulk Density?,» 2025. [En ligne]. Available: iere.org/what-is-soil-bulk-density/.

ANNEXES

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR VOIE HUMIDE BUG1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE/Norme NF P 98-056

Echantillon : **BUG1** Date d'essai 27/11/2025
 Provenance : **BUGARULA-IDJWI** P.AV.LAV 3000 g
 Prescription **Surface** Poids sec 1770 g
 Profondeur : **1m**

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
11/2''	47	38.1	40	0	0	100
11/4''	46	31.7	31.5	0	0	100
1''	45	25,4	25	0	0	100
3/4 ''	44	19,1	20	0	0	100
2/3''	43	16,9	16	0	0	100
1/ 2''	42	12,7	12.5	0	0	100
3/8''	41	9,52	10	84	3	97
1/3''	40	7,93	8	142	5	95
1/4''	39	6,35	6.3	207	7	93
3/16''	38	4,76	5	279	9	91
5	37	4	4	345	12	89
6	36	3,36	3.15	406	14	86
8	35	2,38	2.5	456	15	85
10	34	2	2	499	17	83
12	33	1,68	1.6	546	18	82
16	32	1,19	1.25	586	20	80
18	31	1	1	637	21	79
20	30	0,84	0,8	679	23	77
30	29	0,59	0,63	739	25	75
35	28	0,5	0,5	800	27	73
40	27	0,4	0,4	865	29	71
50	26	0,315	0,315	937	31	69
60	25	0,25	0,25	1023	34	66
70	24	0,2	0,2	1118	37	63
100	23	0,16	0,16	1219	41	59
120	22	0,125	0,125	1295	43	57
140	21	0,1	0,1	1421	47	53
200	20	0,08	0,08	1651	55	45

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 2 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR VOIE HUMIDE BUG2

ANALYSE GRANULOMETRIQUE/Norme NF P 98-056

Echantillon :	BUG2	Date d'essai	27/11/2025	
Provenance :	BUGARULA-IDJWI	P.AV.LAV	3000	g
Prescription	Surface	Poids sec	1122	g
Profondeur :	1m			

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
1''	45	25,4	25	0	0	100
3/4 ''	44	19,1	20	0	0	100
2/3''	43	16,9	16	0	0	100
1/2''	42	12,7	12,5	0	0	100
3/8''	41	9,52	10	161	5	95
1/3''	40	7,93	8	213	7	93
1/4''	39	6,35	6,3	252	8	92
3/16''	38	4,76	5	296	10	90
5	37	4	4	343	11	89
6	36	3,36	3,15	385	13	87
8	35	2,38	2,5	436	15	85
10	34	2	2	481	16	84
12	33	1,68	1,6	540	18	82
16	32	1,19	1,25	603	20	80
18	31	1	1	672	22	78
20	30	0,84	0,8	723	24	76
30	29	0,59	0,63	779	26	74
35	28	0,5	0,5	828	28	72
40	27	0,4	0,4	869	29	71
50	26	0,315	0,315	912	30	70
60	25	0,25	0,25	957	32	68
70	24	0,2	0,2	995	33	67
100	23	0,16	0,16	1021	34	66
120	22	0,125	0,125	1044	35	65
140	21	0,1	0,1	1057	35	65
200	20	0,08	0,08	1105	37	63

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 3 : ANALISE GRANULOMETRIQUE PAR VOIE HUMIDE BUG3

ANALYSE GRANULOMETRIQUE/Norme NF P 98-056

Echantillon : **BUG3** Date d'essai 27/11/2025
 Provenance : **BUGARULA-IDJWI** P.AV.LAV 3000 g
 Prescription **Surface** Poids sec 1897 g
 Profondeur : **1m**

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
1''	45	25,4	25	0	0	100
3/4 ''	44	19,1	20	0	0	100
2/3''	43	16,9	16	0	0	100
1/2''	42	12,7	12,5	0	0	100
3/8''	41	9,52	10	158	5	95
1/3''	40	7,93	8	211	7	93
1/4''	39	6,35	6,3	277	9	91
3/16''	38	4,76	5	335	11	89
5	37	4	4	391	13	87
6	36	3,36	3,15	448	15	85
8	35	2,38	2,5	500	17	83
10	34	2	2	550	18	82
12	33	1,68	1,6	601	20	80
16	32	1,19	1,25	651	22	78
18	31	1	1	714	24	76
20	30	0,84	0,8	765	26	75
30	29	0,59	0,63	837	28	72
35	28	0,5	0,5	908	30	70
40	27	0,4	0,4	984	33	67
50	26	0,315	0,315	1063	35	65
60	25	0,25	0,25	1155	39	62
70	24	0,2	0,2	1253	42	58
100	23	0,16	0,16	1342	45	55
120	22	0,125	0,125	1387	46	54
140	21	0,1	0,1	1505	50	50
200	20	0,08	0,08	1728	58	42

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 4 : LIMITES D'ATTEBERG DU SOL DE BUGARULA BUG1

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	19	22	28	32	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B		
Poids total humide (g)	22	21	23,3	20,04	18,6	-	-		
Poids total sec (g)	21	19	22,1	18,74	17,7	-	-		
Poids de la tare (g)	17	15	18,3	14,52	14,4	-	-		
Poids net d'eau (g)	1,2	1,5	1,2	1,3	0,9	-	-		
Poids net du matériau sec (g)	3,7	4,5	3,8	4,2	3,3	-	-		
Teneur en eau (%)	34,0	33,3	32,0	30,8	28,6	-	-		
				WL= 31,7		WP = NP			
				IP					
				=0,0					

ANNEXE 5 : LIMITES D'ATTEBERG DU SOL DE BUGARULA BUG2

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	17	22	28	34	39	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B		
Poids total humide (g)	25	25	19,5	20,61	22,2	18,1	15,15		
Poids total sec (g)	21	22	17,9	18,53	20,2	17,9	14,91		
Poids de la tare (g)	14	15	14,1	13,74	15,4	16,9	13,97		
Poids net d'eau (g)	3,3	3,3	1,7	2,1	2,0	0,2	0,2		
Poids net du matériau sec (g)	6,8	7,1	3,8	4,8	4,8	1,0	0,9		
Teneur en eau (%)	48,7	46,3	44,6	43,4	41,3	24,0	25,5		
				WL= 44,9		WP=24,7			
				IP=20,2					

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 6 : LIMITES D'ATTEBERG DU SOL DE BUGARULA BUG3

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	17	23	28	32	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B		
Poids total humide (g)	22	21	22,9	23,65	21,01	-	-		
Poids total sec (g)	19	19	21,2	21,6	19,44	-	-		
Poids de la tare (g)	12	13,56	16,1	14,86	14,16	-	-		
Poids net d'eau (g)	2,7	1,8	1,6	2,1	1,6	-	-		
Poids net du matériau sec (g)	7,8	5,3	5,2	6,7	5,3	-	-		
Teneur en eau (%)	35,2	33,0	31,8	30,4	29,7	-	-		
WL=					32,0	WP=NP			
IP=					0,0				

ANNEXE 7 : ESSAI PROCTOR MODIFIE SOL DE BUGARULA BUG1

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	12480		12610		12790		12650		12430	
Poids du moule(g)	6582		6582		6582		6582		6582	
Poids ech. Humide(g)	5898		6028		6208		6068		5848	
Volume du moule(cm ³)	2924,72		2924,72		2924,72		2924,72		2924,72	
Densité humide	2,02		2,06		2,12		2,07		2,00	
Poids humide+tare(g)	23,99	25,37	23,78	26,01	29,29	32,27	24,81	27,13	26,60	31,80
Poids sec+tare(g)	23,02	24,43	22,97	24,78	27,68	30,40	23,55	25,35	24,89	29,43
Poids de la tare(g)	14,26	13,56	15,51	13,88	14,69	17,05	14,98	14,18	14,76	16,48
Numéro de la tare	O	J1	W'	13'	L1	K	7	T12	X	T
Poids de l'eau(g)	0,97	0,94	0,81	1,23	1,61	1,87	1,26	1,78	1,71	2,37
Poids sec matériau(g)	8,76	10,87	7,46	10,9	12,99	13,35	8,57	11,17	10,13	12,95
Teneur en eau(%)	11,07	8,64	10,85	11,28	12,39	14,00	14,70	15,93	16,88	18,30

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

Teneur en eau moyenne(%)	9,85	11,06	13,19	15,31	17,59
Densité sèche	1,84	1,86	1,89	1,85	1,80

ANNEXE 8 : ESSAI PROCTOR MODIFIE SOL DE BUGARULA BUG2

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	11934		12058		12376		12311		12257	
Poids du moule(g)	6582		6582		6582		6582		6582	
Poids ech. Humide(g)	5352		5476		5794		5729		5675	
Volume du moule(cm ³)	2924,72		2924,72		2924,72		2924,72		2924,72	
Densité humide	1,83		1,87		1,98		1,96		1,94	
Poids humide+tare(g)	21,25	19,34	17,86	16,93	19,83	21,70	22,51	21,85	20,25	21,49
Poids sec+tare(g)	20,64	18,77	17,36	16,45	19,02	20,49	20,98	20,67	19,18	20,21
Poids de la tare(g)	16,47	14,71	14,25	13,56	14,68	14,04	13,70	14,53	14,45	14,51
Numéro de la tare	T	X	O	J1	a	⁵	A	P	C2	12
Poids de l'eau(g)	0,61	0,57	0,50	0,48	0,81	1,21	1,52	1,18	1,07	1,28
Poids sec matériau(g)	4,17	4,06	3,11	2,89	4,34	6,45	7,28	6,14	4,73	5,7
Teneur en eau(%)	14,62	14,03	16,07	16,60	18,66	18,75	21,01	19,21	22,62	22,45
Teneur en eau moyenne(%)	14,32		16,33		18,70		20,11		22,53	
Densité sèche	1,60		1,61		1,67		1,63		1,58	

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 9 : ESSAI PROCTOR MODIFIÉ SOL DE BUGARULA BUG3

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	12317		12518		12694		12665		12634	
Poids du moule(g)	6582		6582		6582		6582		6582	
Poids ech. Humide(g)	5735		5936		6112		6083		6052	
Volume du moule(cm ³)	2924,72		2924,72		2924,72		2924,72		2924,72	
Densité humide	1,96		2,03		2,09		2,08		2,07	
Poids humide+tare(g)	23,65	25,16	25,60	23,38	27,43	27,38	25,68	28,58	30,32	25,79
Poids sec+tare(g)	22,66	24,02	24,58	22,33	26,09	25,91	23,97	26,64	27,92	23,56
Poids de la tare(g)	14,01	14,28	17,51	14,56	18,29	14,90	14,57	14,62	16,25	11,64
Numéro de la tare	Z	M	T8	5C	N	q	T2	8	U	7''
Poids de l'eau(g)	0,99	1,14	1,02	1,05	1,34	1,47	1,71	1,94	2,4	2,23
Poids sec matériau(g)	8,65	9,74	7,07	7,77	7,8	11,01	9,4	12,02	11,67	11,92
Teneur en eau(%)	11,44	11,70	13,62	13,51	17,17	13,35	18,19	16,13	20,56	18,70
Teneur en eau moyenne(%)	11,57		13,56		15,26		17,16		19,63	
Densité sèche	1,76		1,79		1,81		1,78		1,73	

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 10 : POINCONNEMENT DU SOL DE BUGARULA BUGI

	5 X 10			5 X 25			5 X 55		
	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>F/kg</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>p/kg</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>P Kg/cm</i>
0.2	0,1			0,1			0		
0.4	0,1			0,4			0,6		
0.6	0,5			0,6			1		
0.8	0,7			0,9			1,5		
1	0,9			1,1			2		
1.5	1,2			1,7			3		
2	2			2,4			4,9		
2.5	2,5			3			6,3		
3	3			4,2			8		
3.5	4			5,1			9,4		
4	4,3			6,3			10,7		
4.5	4,9			7,5			12		
5	5,2			8,9			13,6		
6	6,3			11			15		
7	7,6			13,2			17		
8	8,4			15			19,1		
9	10			17,9			20,2		
10	10,9			19			22,3		

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 11 : POINCONNEMENT DU SOL DE BUGARULA BUG2

	5 X 10			5 X 25			5 X 55		
	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>F/kg</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>p/kg</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>P Kg/cm</i>
0.2	0,2			0,5			0,2		
0.4	0,5			1			0,3		
0.6	0,8			1,1			1		
0.8	1			1,1			1,1		
1	1,1			1,2			1,3		
1.5	1,3			1,6			2		
2	1,5			2			2,5		
2.5	1,8			2,2			3		
3	2			2,5			3,5		
3.5	2,1			2,9			3,8		
4	2,1			3			4,3		
4.5	2,2			3,3			4,8		
5	2,3			3,8			5		
6	2,5			4,1			5,2		
7	2,8			4,8			6		
8	3			5,1			6,5		
9	3,2			5,5			7		
10	3,5			6,1			7,5		

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 12 : POINCONNEMENT DU SOL DE BUGARULA BUG3

	5 X 10			5 X 25			5 X 55		
	Lecture 1/100mm	F/kg	Kg/cm²	Lecture 1/100mm	p/kg	p/kg	Lecture 1/100mm	p/kg	P Kg/cm
0.2	0			0			0,1		
0.4	0			0,1			0,3		
0.6	0			0,1			0,5		
0.8	0,1			0,2			0,8		
1	0,1			0,2			0,9		
1.5	0,3			0,5			1		
2	0,5			0,7			1		
2.5	0,8			1			1,1		
3	0,9			1			1,1		
3.5	1			1,1			1,3		
4	1			1,2			1,6		
4.5	1,1			1,4			1,8		
5	1,3			1,6			2		
6	1,9			2			2,1		
7	2			2,2			2,5		
8	2,4			2,5			2,9		
9	2,9			3			3		
10	3,1			3,3			3,3		

ANNEXE 13 : CBR SELON UTILISATION DES SOL

USE OF MATERIALS ACCORDING TO THEIR CBR (DEGN, 1987) [25]

Range of CBR	Use in road construction
S1 : $0 < \text{CBR} < 5$	Not suitable for road construction
S2 : $5 < \text{CBR} < 10$	Sub-base layer
S3 : $10 < \text{CBR} < 15$	Sub-base layer and backfill
S4 : $15 < \text{CBR} < 30$	Fondation layer for a Traffic T1
S5 : $30 < \text{CBR} < 60$	Fondation layer for trafic T2/T3 and base layer for trafic T1
S6 : $60 < \text{CBR} < 120$	Fondation layer for trafic T3/T4 and base layer for trafic T2
S7 : $\text{CBR} > 120$	Base layer trafic T3

ANNEXE 14: POURCENTAGE DE CBR ET SA CLASSE DE PORTANCE [10]

Classe de portance	Valeur de CBR (%)
S0 Portance très faible	$\text{CBR} < 3$
S1 Portance faible	$3 < \text{CBR} < 6$
S2 portance moyenne	$6 < \text{CBR} < 12$
S3 portance élevée	$12 < \text{CBR} < 25$
S4 portance très élevé	$\text{CBR} > 25$

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 15. TABLE DE CORRESPONDANCE

TABLE DE CORRESPONDANCE

Déformation / Force appliquée

ANNEAU:

Identification: S370-10/AA/0031

Force maximum: 50KN

Déformation

maximum 2,28mm

Lecture (mm)	Force (KN)
0,01	0,22
0,02	0,43
0,03	0,65
0,04	0,87
0,05	1,09
0,06	1,3
0,07	1,52
0,08	1,74
0,09	1,96
0,1	2,17
0,11	2,39
0,12	2,61
0,13	2,83
0,14	3,04
0,15	3,26
0,16	3,48
0,17	3,7
0,18	3,91
0,19	4,13
0,2	4,35
0,21	4,57
0,22	4,78
0,23	5

Lecture	Force
0,57	12,44
0,58	12,67
0,59	12,89
0,6	13,11
0,61	13,33
0,62	13,56
0,63	13,78
0,64	14
0,65	14,22
0,66	14,44
0,67	14,67
0,68	14,89
0,69	15,11
0,7	15,33
0,71	15,56
0,72	15,78
0,73	16
0,74	16,22
0,75	16,44
0,76	16,67
0,77	16,89
0,78	17,11
0,79	17,33
0,8	17,56

Lecture	Force
1,14	25
1,15	25,22
1,16	25,43
1,17	25,65
1,18	25,87
1,19	26,09
1,2	26,3
1,21	26,52
1,22	26,74
1,23	26,96
1,24	27,17
1,25	27,39
1,26	27,61
1,27	27,83
1,28	28,04
1,29	28,26
1,3	28,43
1,31	28,7
1,32	28,91
1,33	29,13
1,34	29,35
1,35	29,57
1,36	29,78
1,37	30

Lecture	Force
1,71	37,56
1,72	37,78
1,73	38
1,74	38,22
1,75	38,44
1,76	38,67
1,77	38,89
1,78	39,11
1,79	39,33
1,8	39,56
1,81	39,78
1,82	40
1,83	40,22
1,84	40,43
1,85	40,65
1,86	40,87
1,87	41,09
1,88	41,3
1,89	41,52
1,9	41,74
1,91	41,96
1,92	42,17
1,93	42,39
1,94	42,61

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

0,24	5,22	0,81	17,78	1,38	30,22	1,95	42,83
0,25	5,43	0,82	18	1,39	30,44	1,96	43,04
0,26	5,65	0,83	18,22	1,4	30,87	1,97	43,26
0,27	5,87	0,84	18,44	1,41	30,87	1,98	43,48
0,28	6,09	0,85	18,67	1,42	31,11	1,99	43,7
0,29	6,3	0,86	18,89	1,43	31,33	2	43,91
0,3	6,52	0,87	19,11	1,44	31,56	2,01	44,13
0,31	6,74	0,88	19,33	1,45	31,78	2,02	44,35
0,32	6,96	0,89	19,56	1,46	32	2,03	44,57
0,33	7,17	0,9	19,78	1,47	32,22	2,04	44,78
0,34	7,39	0,91	20	1,48	32,44	2,05	45
0,35	7,61	0,92	20,22	1,49	32,67	2,06	45,22
0,36	7,83	0,93	20,43	1,5	32,89	2,07	45,43
0,37	8,04	0,94	20,65	1,51	33,11	2,08	45,65
0,38	8,26	0,95	20,87	1,52	33,33	2,09	45,87
0,39	8,48	0,96	21,09	1,53	33,56	2,1	46,09
0,4	8,7	0,97	21,3	1,54	33,78	2,11	46,3
0,41	8,91	0,98	21,52	1,55	34	2,12	46,52
0,42	9,13	0,99	21,74	1,56	34,22	2,13	46,74
0,43	9,35	1	21,96	1,57	34,44	2,14	46,96
0,44	9,57	1,01	22,17	1,58	34,67	2,15	47,17
0,45	9,78	1,02	22,39	1,59	33,89	2,16	47,39
0,46	1	1,03	22,61	1,6	35,11	2,17	47,61
0,47	1,22	1,04	22,88	1,61	35,33	2,18	47,83
0,48	10,44	1,05	23,04	1,62	35,56	2,19	48,04
0,49	10,67	1,06	23,26	1,63	35,78	2,2	48,26
0,5	10,89	1,07	23,48	1,64	36	2,21	48,48
0,51	11,11	1,08	23,7	1,65	36,22	2,22	48,7
0,52	11,33	1,09	23,91	1,66	36,44	2,23	48,91
0,53	11,66	1,1	24,13	1,67	36,67	2,24	49,13
0,54	11,78	1,11	24,35	1,68	36,89	2,25	49,35
0,55	12	1,12	24,57	1,69	37,11	2,26	49,57
0,56	12,22	1,13	24,78	1,7	37,33	2,27	49,78

**CARACTÉRISATION DES SOLS DU GISEMENT DE BUGARULA À IDJWI EN VUE DE LEUR
UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

ANNEXE 16 : RELEVÉ DES LECTURES DES AIGUILLES DE GONFLEMENT-ESSAIS CBR

Type d'aiguille	BUG1		BUG2		BUG3	
	à 0 jour	à 4 jours	à 0 jour	à 4 jours	à 0 jour	à 4 jours
10 coups						
Petite aiguille	9	0 (10)	17	19	8	3
Grande aiguille	0	19	0	83	0	37
25 coups						
Petite aiguille	16	16	0	2	18	21
Grande aiguille	0	95	0	45	0	71
55 coups						
Petite aiguille	6	7	1	3	9	14
Grande aiguille	0	20	0	79	0	2