

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil

Laboratoire pédagogique de mécanique des sols

Laboratoire de Géo-matériaux, Environnement et Aménagement (LGEA)



Mémoire de fin d'études

Master académique en génie civil

Option : Géotechnique

Thème :

**Optimisation de la courbe granulométrique pour une
meilleure portance de la couche de fondation**

Rédigé par :

Messaoudi Noureddine

Devant le jury composé de :

Mr KAHIL Amar (Président)

Mr MELBOUCI Bachir (Promoteur)

Mme BOUZEBODJA (Examinatrice)

Remerciements et dédicaces

Je remercie mon promoteur, le professeur Melbouci Bachir, pour m'avoir fait l'honneur de m'encadrer pour mon mémoire, pour son suivi tout au long du travail, pour son enseignement riche, ainsi que pour sa grande patience et sa compréhension dans les difficultés.

Mes remerciements vont également :

A Melle Belhassani Ouarda et Mme Kahil Faroudja qui ont accepté de faire partie du jury.

A tous mes enseignants pour le savoir transmis.

Aux ingénieurs des laboratoires de mécanique des sols et du LGEA qui m'ont assisté à certaines tâches.

A mes camarades pour leur bonne compagnie durant les études.

Je remercie de manière très privilégiée mes parents et mes sœurs Lila, Amina, Dona et Katia pour leur soutien indéfectible, ainsi que mes beaux-frères Mohamed El Amine, Farouk, Mohammed, Lamine, et tous mes neveux et mes nièces pour leurs encouragements et leur présence.

Je tiens également à remercier mon chat Félix, Européen à poil long, pour son agréable compagnie et ses ronronnements durant mes nuits de travail et de solitude.

Je dédie ce travail à tous les miens et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, au parachèvement de mes études.

Je fais enfin une consécration à deux sentiments que je nourris et qui me font progresser :

A la flamme inextinguible de l'amour, pour mes ami(e)s, pour tous les êtres chers qui ont contribué à faire de moi l'homme que je suis, l'homme que je deviendrai, toujours présents ou perdus, qui ne cesseront jamais de vivre dans mon cœur quoi qu'il arrive.

A cette flamme ardente qui me procure ma vitalité.

A la lueur permanente de l'espoir dans la vie, l'assurance que tout ira pour le mieux, que même si demain sera difficile, que le lendemain le sera encore plus, le surlendemain, lui, finira par être beau. L'espoir restera éternellement permis. Continuer à avancer dans la brume même quand tout va mal, toujours insister, et l'échec imminent finit par se transformer en succès retentissant.

A cette lueur éclatante qui entretient ma ténacité.

"C'est quand tout semble complètement perdu et sans espoir, qu'il faut arborer son plus grand sourire, montrer preuve de confiance sans limite, et se battre jusqu'à la dernière cartouche".

M. F

Table des matières

.....Liste des figures.....	
.....Liste des tableaux.....	
.....Liste des principales notations et indices.....	
.....INTRODUCTION GENERALE.....	0

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I. DEFINITION ET GENERALITES SUR LA COURBE GRANULOMETRIQUE ET LE FUSEAU GRANULOMETRIQUE

I.1. Introduction	1
I.2 Définition d'une courbe granulométrique	1
I.3 Définition d'une courbe granulométrique de référence	2
I.4 Analyse granulométrique	2-4
I.5 Définition d'un fuseau granulométrique	5
I.6 Classes granulaires	6-9
I.7 Conclusion	9

II. ROLE DE LA COUCHE DE FONDATION DANS UNE ROUTE

II.1 Introduction	10
II.2 Définition	10
II.3 Rôle de la couche de fondation	11
II.3.1 Rôle mécanique	11
II.3.2 Rôle lors de l'exécution de la route	12
II.3.3 Rôle drainant	12
II.3.4 Rôle thermique	12
II.4 Cas des couches de fondation en GNT	12
II.4.1 Rôle des couches de fondation en GNT	12
II.4.2 Quelques caractéristiques de la couche de fondation en GNT	13
II.4.2.1 Rigidité	13
II.4.2.2 Granulométrie	13
II.4.2.3 Résistance aux déformations permanentes	13-14
II.5 Conclusion	14

III. GRANULOMETRIE DE LA COUCHE DE FONDATION SELON LES REFERENCES

III.1 Introduction	15
III.2 Selon la norme NF EN 13285 (2010)	15
III.2.1 Dans le cas Micro-Deval $\leq 35\%$ et Los Angeles $\leq 40\%$	15-16
III.2.2 Dans le cas Micro-Deval $> 35\%$ et Los Angeles $> 40\%$	16
III.3 Selon le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, Fascicule 3	17
III.3.1 Classe 0/20	17
III.3.2 Classe 0/31.5	18
III.4 Selon la norme québécoise NQ-2560-114 (BNQ 2002)	19
III.4.1 Passant et fuseau granulométrique	19
III.4.2 Spécifications	20
III.5 Selon la norme ASTM D 1241 – 00 (2015)	20
III.5.1 Passants et fuseaux granulométriques	20-23
III.5.2 Spécifications	24
III.6 Selon le Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux	25-26
III.6.1 Passants et fuseau	25-26
III.6.2 Spécifications	26
III.7 Récapitulatif et comparaison	27
III.8 Conclusion	28

PARTIE EXPERIMENTALE

IV. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

IV.1 Introduction	29
IV.2 Description du travail effectué	29
IV.3 Description des matériaux granulaires de l'étude	30-31
IV.4.1.1 Essai N° 01 : Teneur en eau (NF P 94-050)	32
IV.4.1.2 Résultats de l'essai N° 01 : Teneur en eau (NF P 94-050)	33
IV.4.2.1 Essai N° 2 : Masse volumique des particules solides ρ_s absolue (Méthode du Pycnomètre à Eau, NF P 94-054)	34-36
IV.4.2.2 Résultats de l'essai N° 2 : Masse volumique absolue (NF P 94-054)	36
IV.4.3.1 Essai N°3 : Los Angeles (LA) (NF P 18-573)	37-38
IV.4.3.2 Résultats de l'essai N°3 : Los Angeles (LA) (NF P 18-573)	39

IV.4.4.1 Essai N°4 : Micro-Deval (MDE) (NF P18-572)	40-41
IV.4.4.2 Résultats de l'essai N°4 : Micro-Deval (MDE) (NF P18-572)	42
IV.4.5.1 Essai N°5 : Friabilité Des Sables (NF P 18-576)	43-44
IV.4.5.2 Résultats de l'essai N°5 : Friabilité des sables (NF P 18-576)	44
IV.4.6.1 Essai N°6 : Fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066)	45-46
IV.4.6.2 Résultats de l'essai N°6 : Fragmentabilité des matériaux rocheux	46-47
IV.4.7.1 Essai N°7 : Dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-067)	48-49
IV.4.7.2 Résultats de l'essai N°7 : Dégradabilité des matériaux rocheux	49-50
IV.5 Récapitulatif de tous les essais d'identification	51
IV.6 Conclusion	51

V. GRANULOMETRIES

V.1 Introduction	52
V.2 Justification des choix	52-53
V.3 Choix des tamisats pour les différentes granulométries	54-56
V.4 Résultats des granulométries	57
V.4.1 Granulométrie moyenne (Proctor normal)	58
V.4.2 Granulométrie avec plus de gravier	58
V.4.3 Granulométrie avec plus de sable	59
V.4.4 Granulométrie avec plus de fines	59
V.4.5 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable	60
V.4.6 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines	60
V.4.7 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier	61
V.5 Essais de compactage Proctor (Normal et Modifié) (NF P 94-093)	62
V.5.1 Définition et but de l'essai Proctor	62
V.5.2 Modalités	62
V.5.3 Principe de l'essai	62
V.5.4 Appareillage	63
V.5.5 Prise d'échantillon	63
V.5.6 Exécution de l'essai	64
V.5.7 Choix du type du moule	64-65
V.5.8 Expression des résultats	66
V.5.9 Quelques interprétations et conclusions	67
V.6 Résultats des essais de compactage Proctor (Normal et Modifié)	68

V.6.1 Résultats Proctor normal (granulométrie moyenne)	68
V.6.2 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)	69
V.6.3 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de sable)	70
V.6.4 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de fines)	71
V.6.5 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de fines et moins de sable)	72
V.6.6 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de sable et moins de fines)	73
V.6.7 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de fines, plus de sable et moins de gravier)	74
V.7 Récapitulatifs des résultats des essais Proctor et interprétation	75-76
V.8 Conclusion	77

VI. ESSAIS DE PORTANCE CALIFORNIENS

VI.1 Introduction	78
VI.2 Présentation de l'essai CBR	78
VI.2.1 Domaine d'application	78
VI.2.2 L'indice CBR immédiat (CBR immédiat)	78
VI.2.3 L'indice CBR après immersion (CBR immersion)	78-79
VI.2.4 Principe de l'essai	79
VI.2.5 Appareillage (CBR immédiat)	79
VI.2.6 Appareillage (CBR immersion)	80
VI.2.7 Matériel de poinçonnement	80
VI.2.8 Confection des éprouvettes	81
VI.2.9 Détermination de l'indice CBR immédiat (CBR)	81
VI.2.10 Détermination de l'indice CBR après immersion	82
VI.2.11 But de l'imbibition (immersion dans l'eau)	82
VI.2.12 Expression des résultats et interprétations	82-83
VI.3 Présentation des résultats de l'essai de portance Californien (CBR) Indices de portance immédiat et après immersion	84
VI.3.1 Granulométrie avec plus de gravier (CBR immédiat)	84
VI.3.2 Granulométrie avec plus de sable (CBR immédiat)	85
VI.3.3 Granulométrie avec plus de fines (CBR immédiat)	85
VI.3.4 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable (CBR immédiat)	86
VI.3.5 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines (CBR immédiat)	86
VI.3.6 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier (CBR immédiat)	87
VI.3.7 Granulométrie avec plus de gravier (CBR immersion)	87
VI.3.8 Granulométrie avec plus de sable (CBR immersion)	88
VI.3.9 Granulométrie avec plus de fines (CBR immersion)	88
VI.3.10 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable (CBR immersion)	89

VI.3.11 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines (CBR immersion)	89
VI.3.12 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier (CBR immersion)	90
VI.4 Récapitulatif des résultats et interprétation	90-94
VI.5 Conclusion	94
.....CONCLUSION GENERALE.....	95
.....Bibliographie.....	
.....ANNEXE.....	



Liste des figures

Figure I.1 : Exemple d'une courbe granulométrique d'un échantillon de sable	1
Figure I.2 : Exemple de courbes granulométriques de référence pour certains matériaux, ainsi que les tableaux des passants et des caractéristiques des courbes	2
Figure I.3 : Exemple de fuseau granulométrique d'un sable filtrant	5
Figure I.4 : Dénomination détaillée des sols	6
Figure I.5 : Seuils granulométriques pour divers pays	8
<hr/>	
Figure II.1 : Coupe transversale d'une chaussée	10
<hr/>	
Figure III.1 : Fuseau défini par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $MD \leq 35$ et $LA \leq 40$	16
Figure III.2 : Fuseau défini par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $LA > 40$ et $MD > 35$	16
Figure III.3 : Fuseau des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/20) selon le CDCN (fascicule 3)	17
Figure III.4 : Fuseau des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/31.5) selon le CDCN (fascicule 3)	18
Figure III.6 : Fuseau défini par la norme NQ-2560-114 pour les couches de fondation	19
Figure III.7 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation A)	21
Figure III.8 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation B)	21
Figure III.9 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation C)	22
Figure III.10 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation D)	22
Figure III.11 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation E)	23
Figure III.12 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme ASTM 1241 – 00 (Gradation F)	23
Figure III.13 : Fuseau granulométrique pour les couches d'assise (concassés 0/31.5) selon le CEBTP (1984)	25
Figure III.14 : Fuseau granulométrique pour les couches d'assise (concassés 0/40) selon le CEBTP (1984)	26
Figure III.15 : Comparaison des fuseaux ASTM, NF EN, NQ et CTTP	27

Figure IV.1 : Classes 25-20 et 20-10 du matériau utilisé	30
Figure IV.2 : Classes 10-4 et 4-2 du matériau utilisé	30
Figure IV.3 : Classes 1-0.5 et 0.5-0.063 du matériau utilisé	30
Figure IV.4 : Fines (0.063-0) du matériau utilisé	30
Figure IV.5 : Pycnomètre en verre utilisé pour l'essai de la masse volumique	34
Figure IV.6 : Machine Los Angeles	37
Figure IV.7 : Une des boules utilisée pour la charge Los Angeles	37
Figure IV.8 : Figure IV.8 : Appareillage Micro-Deval	40
Figure IV.9 : Figure IV.9 : Charge abrasive du Micro-Deval	40
Figure IV.10 : Courbe granulométrique de l'échantillon avant et après fragmentation	46
Figure IV.11 : Courbe granulométrique de l'échantillon avant et après dégradation.....	50

Figure V.1 : Fuseau de spécification et des valeurs déclarées décrits par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec LA inférieur à 40 et MDE inférieur ou égal à 35	53
Figure V.2 : Courbe granulométrique moyenne	58
Figure V.3 : Courbe granulométrique à plus de gravier	58
Figure V.4 : Courbe granulométrique à plus de sable	59
Figure V.5 : Courbe granulométrique à plus de fines	59
Figure V.6 : Courbe granulométrique à plus de fines et moins de sable	60
Figure V.7 : Courbe granulométrique à plus de sable et moins de fines	60
Figure V.8 : Courbe granulométrique à plus de fines, plus de sable et moins de gravier	61
Figure V.9 : Tout l'appareillage utilisé pour les compactages Proctor	63
Figure V.10 : Compactage Proctor modifié	64
Figure V.11 : Moule Proctor modifié après compactage	64
Figure V.12 : Quelques bacs de GNT pesés s'apprêtant à être mélangés, humidifiés et compactés	67
Figure V.13 : Courbe Proctor normal (granulométrie moyenne)	68
Figure V.14 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)	69
Figure V.15 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de sable)	70
Figure V.16 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines)	71
Figure V.17 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines et moins de sable)	72
Figure V.18 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de sable et moins de fines)	73
Figure V.19 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines, plus de sable et moins de gravier)	74

Figure V.20 : Courbes Proctor de toutes les granulométries	75
--	----

Figure VI.1 : Tout le matériel de confection des éprouvettes (CBR)	79
Figure VI.2: Imbibition et gonflement (CBR après immersion)	80
Figure VI.3 : CBR Geocomp Load Trac II servant à poinçonner les éprouvettes (CBR)	80
Figure VI.4 : Eprouvette après poinçonnement	81
Figure VI.5 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de gravier (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	84
Figure VI.6 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	85
Figure VI.7 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	85
Figure VI.8 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines et - de sable (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	86
Figure VI.9 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable et - de fines (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	86
Figure VI.10 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines, + de sable et moins de gravier (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II	87
Figure VI.11 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de gravier (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	87
Figure VI.12 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	88
Figure VI.13 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	88
Figure VI.14 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines et - de sable (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	89
Figure VI.15 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable et -de fine (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	89
Figure VI.16 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines, + de sable et - de gravier (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II	90
Figure VI.17 : Les courbes effort-poinçonnement du CBR (Geocomp Loadtrac II)	91
Figure VI.18 : Les courbes effort-poinçonnement du CBR immersion (Geocomp Loadtrac II)	91

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Exemple de présentation des résultats d'une analyse granulométrique	4
Tableau I.2: Classification texturale des sols selon le CCDG	7
Tableau I.3 : Tableau des classes granulaires utilisées actuellement	9

Tableau III.1 : Passants définis par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $LA \leq 40$ et $MD \leq 35$	15
Tableau III.2 : Passants définis par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $LA > 40$ et $MD > 35$	16
Tableau III.3 : Passants des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/20) selon le CDCN (fascicule 3)	17
Tableau III.4 : Passants des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/31.5) selon le CDCN (fascicule 3)	18
Tableau III.5 : Passants minimums et maximums définis pour les MG20 par la norme NQ-2560-114	19
Tableau III.6 : Passants des matériaux granulaires pour assises de chaussées selon la norme (ASTM 1241 - 00)	20
Tableau III.7 : Passants pour couche d'assise de chaussée dans le cas de concassés 0/31.5 et 0/40 selon le CEBTP (1984)	25

Tableau IV.1 : Masses minimales de l'échantillon en fonction des diamètres des plus gros grains au sein du matériau utilisé	32
Tableau IV.2 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue	36
Tableau IV.3 : Valeurs de référence pour l'essai Los Angeles	38
Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Los Angeles	39
Tableau IV.5 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure	41
Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Micro-Deval et récapitulatif avec l'essai Los Angeles	42
Tableau IV.7 : Récapitulatif des résultats de l'essai de friabilité des sables	44
Tableau IV.8 : résultats de l'essai de fragmentabilité	46
Tableau IV.9 : Valeurs de références	49
Tableau IV.10 : Résultats de l'essai de dégradabilité	49

Tableau V.1 : Pourcentages en masse passants décrit par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec LA inférieur à 40 et MDE inférieur ou égal à 35	52
Tableau V.2 : Passants choisis pour les granulométries plus de gravier, plus de sable et plus de fines	55
Tableau V.3 : Passants choisis pour les granulométries plus de fines et moins de sable ; plus de sable et moins de fines ; plus de fines, plus de sable et moins de gravier	55
Tableau V.4 : Pourcentage en masse attribués à chaque classe durant les essais Proctor	56
Tableau V.5 : Classes granulométriques en fonction de Cu selon la norme (NF P 94-056)	57
Tableau V.6 : Caractérisation en fonction du Cu et Cc selon la norme (NF P 94-056)	57
Tableau V.7 : Caractéristiques Cc et Cu des différentes courbes granulométriques	61
Tableau V.8 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (NF P 94-093)	65
Tableau V.9 : Résultats de l'essai Proctor normal (granulométrie moyenne)	68
Tableau V.10 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)	69
Tableau V.11 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de sable)	70
Tableau V.12 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de fines)	71
Tableau V.13 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de fines et moins de sable)	72
Tableau V.14 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de sable et moins de fines)	73
Tableau V.15 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de fines, plus de sable et moins de gravier)	74
Tableau V.16 : Récapitulatif des résultats des essais Proctor	75
Tableau V.17 : Classement des granulométries selon la teneur en eau optimale par ordre décroissant	76
Tableau V.18 : Classement des granulométries selon la masse volumique optimale par ordre décroissant	76

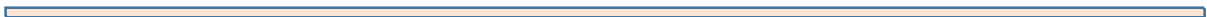
Tableau VI.1 : Indices CBR en fonction de la nature des sols (valeurs de référence) (Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, CEBTP, 1984)	83
Tableau VI.2 : Récapitulatif des indices CBR immédiat et après immersion	92
Tableau VI.3 : Classement des granulométries (absence d'immersion) selon la portance par ordre décroissant	92
Tableau VI.4 : Classement des granulométries sous immersion selon la portance par ordre décroissant	93
Tableau VI.5 : Résultats des tassements obtenus à l'immersion	93

Tableau Annexe 1 : Répartition des classes granulaires dans une éprouvette de 2.5 kg (unités en kilogrammes) durant les compactages Proctor normal

Tableau Annexe 2 : Répartition des classes granulaires dans une éprouvette de 4.5 kg (unités en kilogrammes) durant les compactages Proctor modifié (moins de sable et moins de fines)

Tableau Annexe 3 : Répartition des classes granulaires dans une éprouvette de 5 kg (unités en kilogrammes) durant les compactages Proctor

Tableau Annexe 4 : Répartition des classes granulaires dans une éprouvette de 5.5 kg (unités en kilogrammes) durant les compactages Proctor (plus de sable et plus de fines)



Liste des principales notations et indices

Δh : Gonflement mesuré	G : Gonflement linéaire relatif
CBR IMD : Indice de portance immédiat	GNT : Grave Non Traitée
CBR IMM : Indice de portance sous immersion	GTR : Guide des terrassements routier
CBR : California Bearing Ratio (Indice de portance Californien)	I2.5 : Indice CBR établi à 2.5 mm d'enfoncement
Cc : Coefficient de courbure	I5 : Indice CBR établi à 5 mm d'enfoncement
Cu : Coefficient d'uniformité	IPI : Indice portant immédiat
Cum : Cumulé	LA : Coefficient Los Angeles
D : Plus grand diamètre	M : Masse
D : Plus petit diamètre	MDE : Coefficient Micro-Deval par immersion
d/D : Fraction du plus petit au plus grand diamètre	MDs : Coefficient Micro-Deval
D10 : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés	Ms : Masse sèche
D30 : Diamètre correspondant à 30% des tamisats cumulés	Mw : Masse de l'eau évaporée
D60 : Diamètre correspondant à 60% des tamisats cumulés	NF P : Norme des bâtiments
DG : Coefficient de dégradabilité	NF : Norme Française
EN : European Norm	tr/min : tours par minute
F : Force	Vs : Volume sec
FR : Coefficient de fragmentabilité	Vw : Volume de l'eau
FS : Coefficient de friabilité	W : Teneur en eau
	ρ : Masse volumique des particules solides du sol
	ρ_w : Masse volumique de l'eau

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les routes sont l'un des ouvrages les plus basiques, néanmoins des plus essentiels du génie civil et des travaux publics. Elles font l'objet de très nombreuses méthodes de calculs, de dimensionnements, de conception et de réalisation.

Un des paramètres fondamentaux pour mesurer la qualité et la durabilité d'une route est sa capacité portante. Plus elle est élevée, plus elle peut supporter de charges et des trafics plus importants. Il est possible d'influencer de plusieurs manières les caractéristiques d'une route pour faire en sorte d'augmenter sa capacité portante. On peut améliorer le sol support, prévoir des matériaux adéquats traités aux liants pour la réalisation des couches d'assises, assurer une excellente exécution des travaux... mais cela implique forcément des coûts plus élevés. Pourtant, il existe un procédé bien plus économique qui nous permet d'optimiser la portance de la couche de fondation, sans additifs ni travaux supplémentaires, mais uniquement avec l'usage de graves non traitées, donc de concassés bruts de carrière : Il s'agit de la modification de la courbe granulométrique du matériau.

Les classes granulaires jouent chacune un rôle bien particulier et déterminent directement le comportement mécanique d'un mélange constituant une assise de chaussée. Augmenter le pourcentage de certaines classes, et diminuer d'autres, peut avoir une incidence directe sur la capacité portante, qui peut se voir soit augmenter, ou au contraire diminuer.

Ce travail consistera à essayer de déterminer quelles courbes granulométriques permettent d'obtenir une couche de fondation de route avec une capacité portante optimisée par rapport à ce qu'elle serait avec une courbe granulométrique basique.

Le mémoire comporte deux parties : une partie bibliographique comportant trois chapitres, et une partie expérimentale.

Dans le premier chapitre, nous définirons les généralités sur la courbe granulométrique et le fuseau granulométrique.

Le deuxième chapitre montrera l'importance que représente la couche de fondation et son rôle dans l'assise.

Puis nous passerons en revue dans le troisième chapitre quelques granulométries spécifiées pour la couche de fondation selon différentes références et normes.

Enfin, dans la partie expérimentale, nous utiliserons des GNT, identifiées dans un premier temps, pour préparer plusieurs mélanges granulaires aux granulométries diverses et déterminées, que nous soumettrons ensuite à des essais de portance Californiens.

Nous terminerons par la présentation des résultats obtenus et en tirant les conclusions adéquates selon chaque granulométrie testée, en déterminant lesquelles finalement permettent d'avoir une capacité portante optimisée.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

DEFINITIONS ET GENERALITES

SUR LA COURBE

GRANULOMETRIQUE ET LE

FUSEAU GRANULOMETRIQUE

I. DEFINITION ET GENERALITES SUR LA COURBE GRANULOMETRIQUE ET LE FUSEAU GRANULOMETRIQUE

I.1. Introduction

Les matériaux granulaires sont des matériaux constitués de grains solides qui interagissent entre eux ou niveau des points de contact sous des sollicitations extérieures

Malgré l'utilisation très importante de ce type de matériau, Dawson (2001) note que les matériaux granulaires MG sont probablement les matériaux de chaussées dont les bases et connaissances scientifiques sont les plus limitées. Selon ce dernier, la production, la mise en place, le contrôle, les normes et le dimensionnement reposent sur des approches n'ayant que peu évoluées depuis maintenant plus de 70 ans.

En effet, au cours des dernières années, peu d'efforts ont été investis pour améliorer les caractéristiques et maximiser la performance des matériaux granulaires de fondation. La fondation étant un élément structural clé d'une chaussée, la performance globale de celle-ci est donc intimement liée à celle de la granulométrie utilisée (Dawson 1995).

I.2 Définition d'une courbe granulométrique

Une courbe granulométrique est une courbe traduisant la granularité d'un granulat, avec en abscisse la dimension des mailles des tamis, sur une échelle logarithmique, et en ordonnée les pourcentages en masse des tamisats ou passants (Jean-Luc Blin-Lacroix, 2011). Une courbe granulométrique est donc tracée sur une échelle semi-logarithmique.

La courbe granulométrique est obtenue à la suite d'une analyse granulométrique.

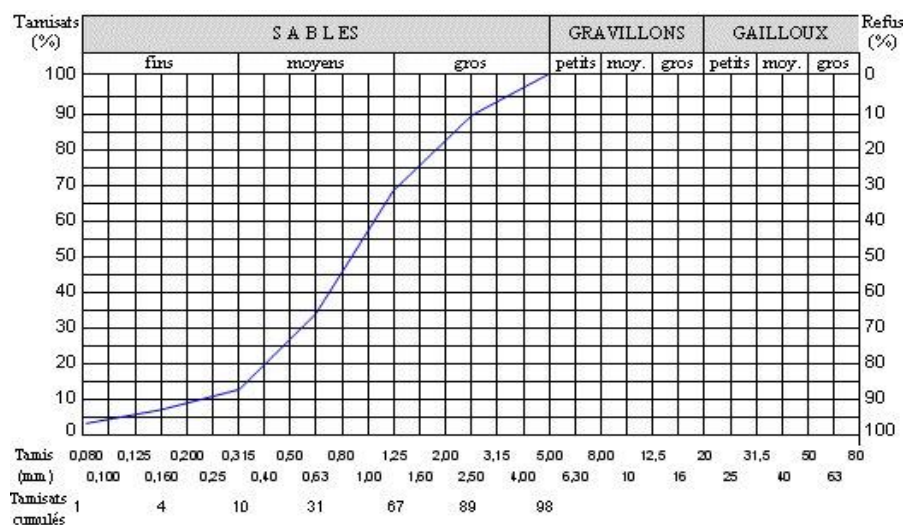


Figure I.1 : Exemple d'une courbe granulométrique d'un échantillon de sable.

<https://www.ecobati.com/fr/a-propos/services/conseils/lexique/courbe-granulometrique>

I.3 Définition d'une courbe granulométrique de référence

Une courbe granulométrique dite de référence est une courbe empirique ou expérimentale qui traduit un mélange granulaire optimisé pour un critère donné. Ex. Courbe granulométrique de référence de la méthode Dreux-Gorisse pour la formulation des bétons (Jean-Luc Blin-Lacroix, 2011). Il s'agit donc d'une courbe typique à laquelle nous sommes censés nous attendre dans l'étude d'un matériau connu de la recherche qui a déjà été référencé par le passé. Il s'agit aussi d'une courbe modèle que nous devons prévoir dans le cadre de l'exécution d'un ouvrage déterminé pour atteindre les prérequis nécessaires au bon fonctionnement de l'ouvrage, comme une assise de chaussée ou un remblai de soutènement.

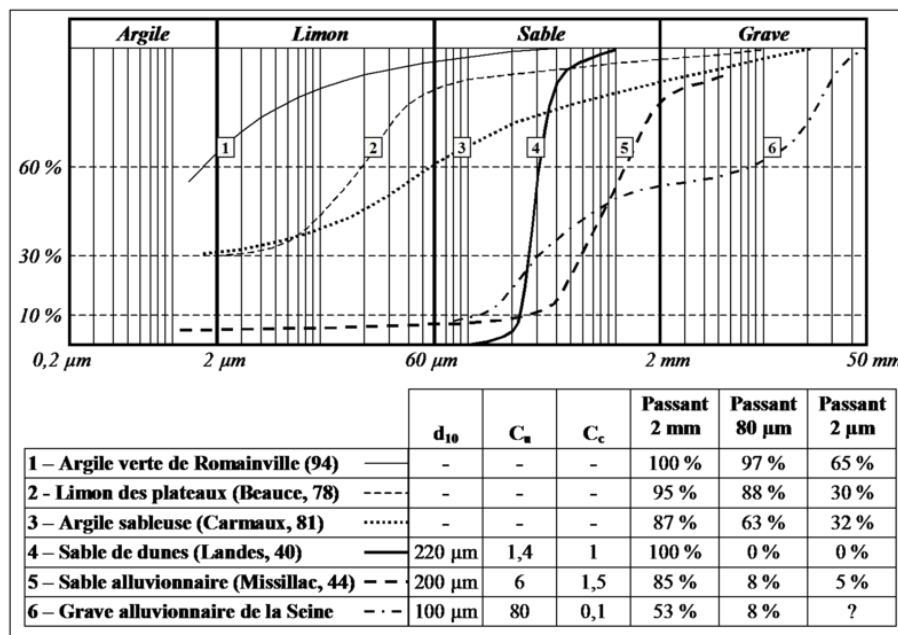


Figure I.2 : Exemple de courbes granulométriques de référence pour certains matériaux, ainsi que les tableaux des passants et des caractéristiques des courbes.

http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Fichier:Exemple_courbes_granulometriques.png

I.4 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai consistant à classer les différents grains constituant un échantillon de granulats. On distingue deux types d'analyses :

- L'analyse granulométrique par tamisage à sec (avant ou après lavage).
- L'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Le premier s'effectue avec l'usage d'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 après vibration de la colonne de tamis et par pesée des refus et passants de chaque tamis.

Le deuxième permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80 micromètres) d'un échantillon de granulats, toujours en fonction des dimensions, par sédimentation, donc en mesurant le temps que prennent les particules fines pour se décanter. Il sert à compléter l'analyse par tamisage.

Elle permettra ainsi de comprendre la répartition des différentes classes granulaires dans le matériau et de détecter la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes classes granulaires

Quelques termes liés à l'analyse granulométrique :

Refus :

Désigne la partie des grains retenue dans un tamis.

Refus cumulé :

Représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré additionné aux grains bloqués dans les tamis des mailles supérieures)

Tamisât (ou passant) :

Désigne le matériau qui traverse le tamis

Tamisât cumulé :

Représente tous les grains qui passent jusqu'au tamis considéré (les grains passés à travers le tamis considéré additionné aux grains passés dans les tamis des mailles inférieures).

Ce sont les valeurs du tamisât cumulé qui sont retenues pour tracer une courbe granulométrique.

d60, d30 et d10 :

Diamètre des tamis correspondant respectivement à 60%, 30 % et 10 % du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

Coefficient d'uniformité :

Rapport des dimensions des mailles de tamis pour lesquels il y a respectivement 60% et 10% de passant : $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

Il caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un matériau.

Coefficient de courbure :

Rapport des dimensions des mailles de tamis défini par : $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$

Il permet de décrire la forme de la courbe granulométrique.

Tableau I.1 : Exemple de présentation des résultats d'une analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat cumulé (%)
5	000.0	000.0	00.00	100
2.5	161.0	161.0	16.10	83.90
1.25	136.0	297.0	29.70	70.30
0.63	177.0	474.0	47.40	52.60
0.315	304.0	778.0	77.80	22.20
0.16	152.0	930.0	93.00	07.00
0.08	054.0	984.0	98.40	01.60
fond	007.5	991.5	99.15	00.85

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

Les limites d et D de la classe granulaire en question ;

La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ;

La continuité ou la discontinuité de la granularité ;

En outre, le type de granulométrie (granulométrie continue et granulométrie discontinue) a un effet sur les propriétés des couches de chaussée. Une courbe granulométrique contient beaucoup plus d'informations utiles pour comprendre l'origine du matériau, prédire ses propriétés mécaniques et hydrauliques, saturées et non saturées (Chapuis, 2016). Elle a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (Los Angeles, Micro-Deval, fragmentation dynamique).

I.5 Définition d'un fuseau granulométrique

Il s'agit d'une notion essentielle pour définir avec précision la granularité d'un matériau, qu'il s'agisse de roches meubles, ou de granulats élaborés. Le fuseau granulométrique se définit comme l'enveloppe de la série de courbes granulométriques obtenues (ou à obtenir, s'il s'agit d'une spécification) sur le matériau étudié (ou livré, ou à livrer, s'il s'agit d'une spécification). Il est en général déterminé par traitement statistique (Prax, 1979)

De très nombreuses classifications granulométriques ont été proposées, notamment par A. Atterberg, F. Rinne, J. Bourcart. Les limites entre les catégories distinguées correspondent en général à des changements des propriétés mécaniques et physiques des grains.

Selon (Jeuffroy & Raymond Sauterey, Cours de routes, contrôles de qualité, 1991), on distingue trois sortes de fuseaux granulométriques dans le cas des routes :

- le fuseau de régularité, ou de tolérance, qui définit l'étendue de la zone dans laquelle doivent se situer 95 % des courbes obtenues au cours du contrôle ;
- Le fuseau de spécification qui est propre à la technique considérée, celui qui définit la zone dans laquelle doivent se situer les fuseaux de tolérance ;
- Le fuseau de fabrication, qui contient 95 % des courbes granulométriques du matériau fabriqué. Un fuseau de fabrication est entièrement inclus dans le fuseau de régularité. Sa définition requière au moins 15 valeurs afin d'être suffisamment représentatif et est établi par le producteur de granulats.

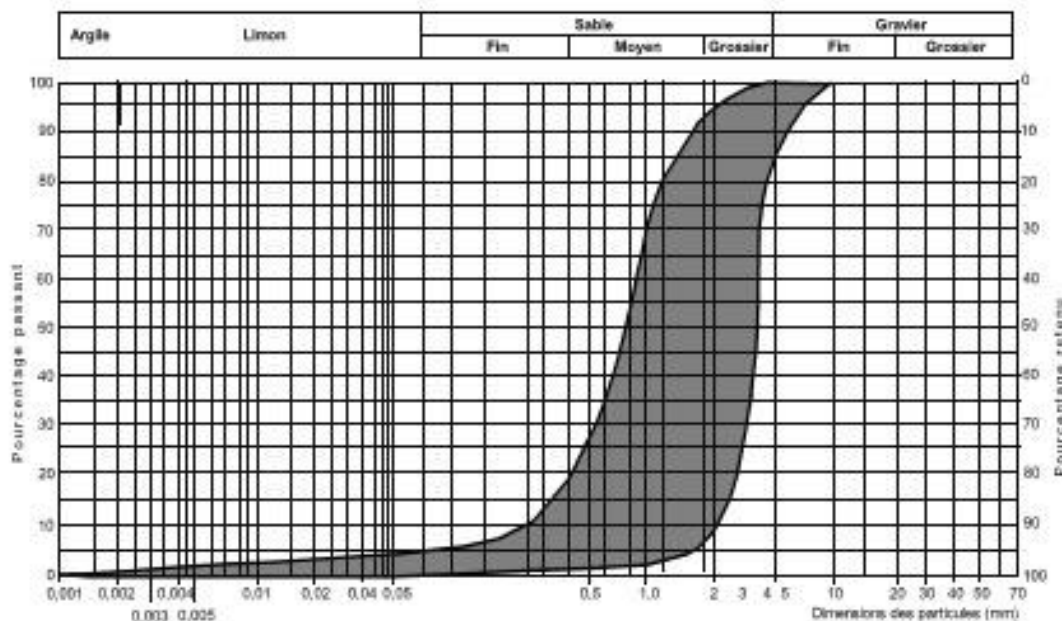


Figure I.3 : Exemple de fuseau granulométrique d'un sable filtrant
https://www.spanc66.fr/wp-content/uploads/2019/04/fuseau_granul_petit.jpg

Du point de vue de la granulométrie des matériaux granulaires utilisés pour les fondations routières, elle est basée sur un fuseau granulométrique de spécification selon les normes. Ce fuseau est relativement large et englobe une certaine gamme de matériaux.

I.6 Classes granulaires

La classe granulaire permet d'identifier un granulat, afin de le différencier d'un autre granulat selon les diamètres minimal et maximal. Une classe s'écrit sous la forme normalisée d/D, le petit « d » étant le plus petit diamètre du granulat compris dans la classe, le grand « D » étant le plus grand diamètre du granulat. On peut également rencontrer un autre type d'écriture d'une classe sous la forme (D - d)

Une classe granulaire se définit par une lecture de la courbe granulométrique. Le plus petit diamètre se retrouve au début de la courbe, généralement à gauche, le plus grand diamètre donc à droite. Le petit diamètre devient représentatif quand la valeur de son tamisât cumulé est la première à atteindre 5 %. Le plus grand diamètre devient représentatif quand la valeur de son refus cumulé est le dernier à atteindre 5 %.

Dans les trois figures suivantes sont montrés les dénominations les plus courantes, les seuils granulométriques, ainsi que les diamètres représentatifs selon chaque pays et norme.

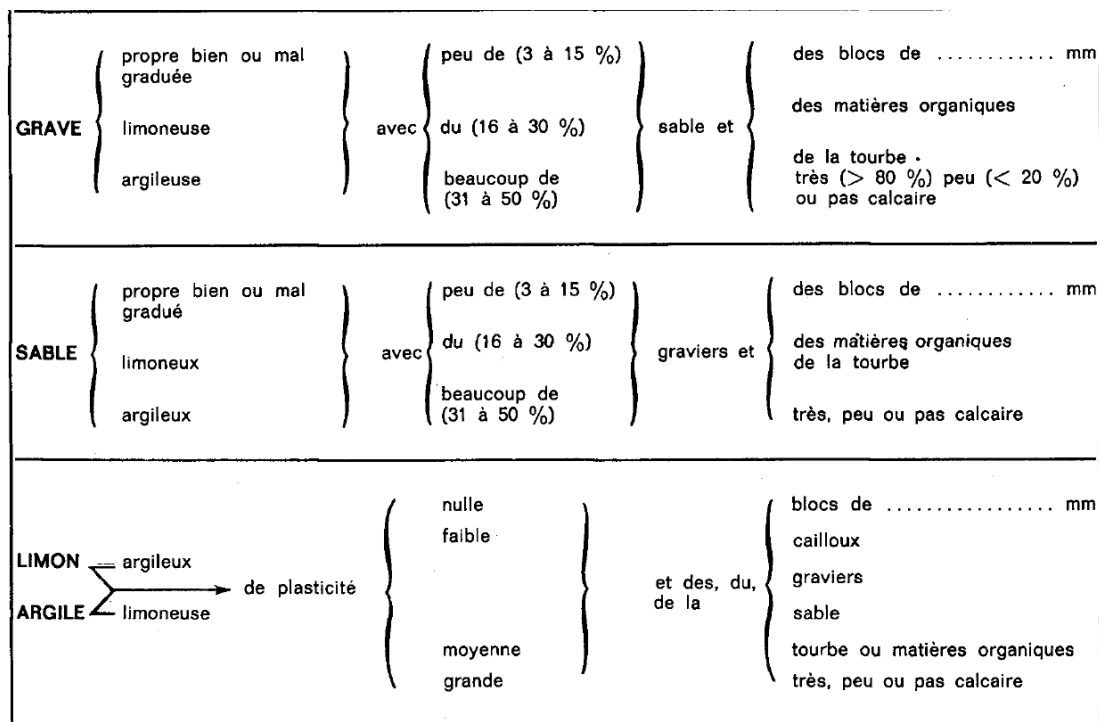


Figure I.4 : Dénomination détaillée des sols (Ch. Schon, 1965)

Chapitre I : Définitions et généralités

Tableau I.2: Classification texturale des sols selon le CCDG (Cahier des charges et devis généraux : infrastructures routières : construction et réparation, 2010)

Gravier (G)	Sol contenant 50 % et moins de particules passant le tamis de 5 mm
Gravier fin	Sol contenant 0 % et moins de particules passant le tamis de 5 mm et 80 % et plus passant le tamis de 20 mm
Gros gravier	Sol contenant moins de 80 % de particules passant le tamis de 20 mm et plus de 80 % passant le tamis de 56 mm
Gravier à galets (cailloux)	Sol contenant de 50 à 80 % de particules passant le tamis de 56 mm et ayant un diamètre maximal inférieur à 200 mm
Gravier à blocs	Sol ou gravier contenant des particules plus grosses que 200 mm
Sable (S)	Sol contenant moins de 50 % de particules passant le tamis de 60 micromètres et dont plus de 50 % des particules retenues sur ce tamis passent le tamis de 5 mm
Sable fin	Sol contenant plus de 50 % de particules passant le tamis de 315 micromètres
Sable moyen	Sol contenant moins de 50 % de particules passant le tamis de 315 micromètres et plus de 50 % passant le tamis de 1.25 mm
Gros sable	Sol contenant moins de 50 % de particules passant le tamis de 1.25 mm
Limon (M) et argile (C)	Sol contenant 50 % et plus de particules passant le tamis de 80 micromètres
Gravier sableux (GS)	Sol contenant de 40 à 50 % de particules passant le tamis de 5 mm
Sable graveleux (SG)	Sol contenant de 50 à 60 % de particules passant le tamis de 5 mm
Matières organiques (O)	Sol contenant des particules combustibles de dimensions variables, de la grosseur d'une molécule à celle de fibres longues de plusieurs centimètres

Chapitre I : Définitions et généralités

SEUILS GRANULOMETRIQUES POUR DIVERS PAYS		60	20,0	6,0	2,0	0,6	0,4	0,2	0,06	0,02	0,006	0,002
Atterberg (1905) Nomencl. Routière	Cailloux		Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
British Standard System	Cailloux		Graviers		Sables gros moyens fins				Limons gros moyens fins		Argiles	
Sté Autrichienne de recherches routières	Cailloux		Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
Massachus. Instit. of Technology	Cailloux		Graviers		Sables				Limons		Argiles	
Sté Allemande de Rech. Rout. ; DIN 4022	Cailloux		Graviers gros moyens fins		Sables gros moyens fins				Limons		Argiles	
Suisse Norme S.N.V.	Cailloux		Graviers		Sables				Limons		Argiles	
C.R.R. Bruxelles Belgique	Cailloux Fraction (VI)		Graviers (v)		Sables gros (IV) fins (III)				Limons (II)		Argiles (I)	
A.S.T.M.	Cailloux		Graviers gros fins		Sables gros fins				Limons		Argiles	
U.S.C.S. Corps of engineers	Cailloux		Graviers gros fins		Sables gros moyens fins				Limons et (ou) Argiles			
A.A.S.H.O.	Cailloux		Graviers gros moyens fins		Sables gros moyens fins				Limons		Argiles	
Civils Aeronautics Administration (U.S.Q.)			Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
		76,2	25,4 19,1	9,52 4,76	2,0	0,42 0,25	0,074 0,05			0,005		

Figure I.5 : Seuils granulométriques pour divers pays (Ch. Schon, 1965)

Actuellement la classe granulaire est définie par une lecture directe de la courbe granulométrique. La norme NF P 18-304 précise qu'un granulat est dit (d/D) si d et D répondent aux 4 conditions suivantes (tableau I.3).

Tableau I.3 : Tableau des classes granulaires utilisées actuellement.

N°	Dimension de tamis à repérer	Mesure à prendre	Condition à vérifier
1	0.63 d	Tamisât cumulé T'	T' < 3% (Si D > 5mm) Ou T' < 5% (Si D < 5mm)
2	d	Tamisât cumulé T	1% < T < 15% (Si D < 1.56d) 1% < T < 20% (Si D > 1.56d)
3	D	Refus cumulé R	1% < R < 15% (Si D < 1.56d) 1% < R < 20% (Si D > 1.56d)
4	1.56 D	Refus cumulé R'	R' = 0

La vérification de ces quatre conditions permet de garantir que d et D sont respectivement les plus petit et plus grand tamis sur lesquels les granulats sont en quantité représentative. En général, $D = d \sqrt[10]{10}$

I.7 Conclusion

Les notions simples, mais fondamentales, énoncées dans ce chapitre introductif, seront le socle sur lequel se basera le travail effectué. Tamisât, granulométrie, courbe granulométrique, fuseau, classe granulaire, gravier, sable et fines seront les mots clés autour desquels vont graviter les prochains chapitres.

Chapitre II

Rôle d'une couche de fondation dans une route

II. ROLE DE LA COUCHE DE FONDATION DANS UNE ROUTE

II.1 Introduction

Une route est constituée de plusieurs éléments se matérialisant sous forme de couches structurales horizontales édifiées les unes sur les autres. Chacune de ces couches a un rôle bien spécifique pour le bon fonctionnement de la chaussée. Nous traiterons dans ce chapitre le rôle particulier de la couche de fondation. La sensibilité de la couche de fondation est liée à divers indicateurs granulométriques liés à diverses fractions granulométriques.

II.2 Définition

Une couche de fondation est l'une des deux couches d'assise de chaussée, avec la couche de base. Elle est située sous une couche de base, et au-dessus d'une couche de forme. Les matériaux de fondation des chaussées sont donc, au sens granulométrique, des graviers sableux ou des sables graveleux la plupart du temps. Ces matériaux sont généralement concassés afin d'assurer une bonne résistance interne et une friction inter granulaire élevée.

La figure II.1 montre l'ensemble des éléments d'une chaussée et la situation exacte de la couche de fondation.

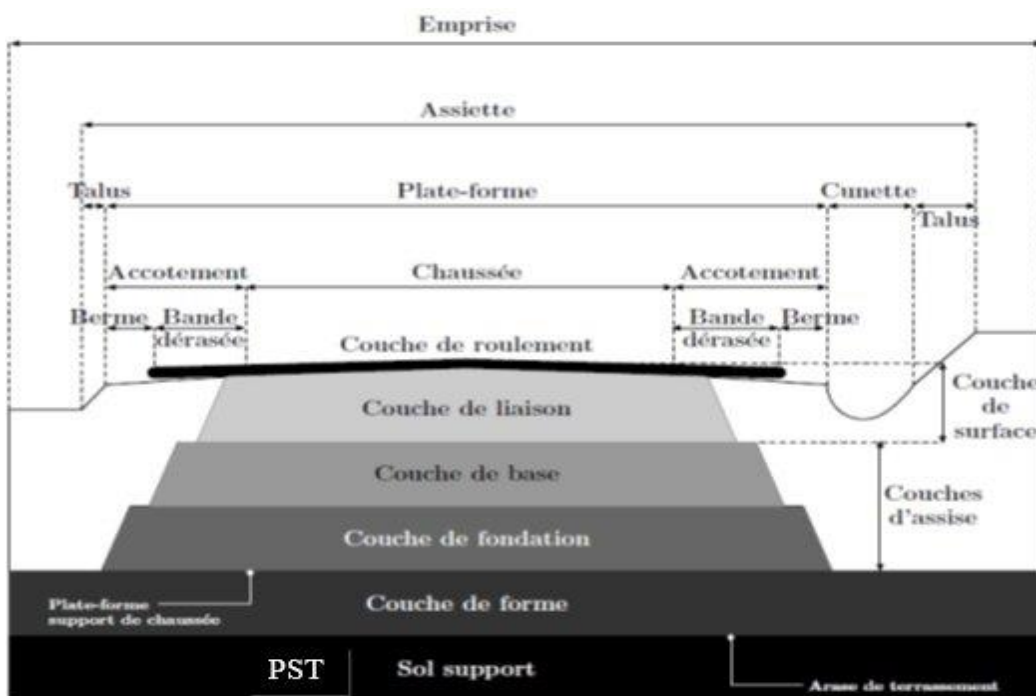


Figure II.1 : Coupe transversale d'une chaussée

Plusieurs exigences doivent être satisfaites afin qu'un granulat puisse être utilisé comme matériau granulaire pour les fondations.

Le résultat à l'essai Micro-Deval doit être inférieur à 35 %, le résultat à l'essai Los Angeles doit être inférieur à 50 % et la somme des résultats de ces deux essais doit être inférieure à 80 %. Le pourcentage de matière organique doit être inférieur ou égal à 0,8 %.

Du point de vue de la granulométrie, qui est la caractéristique principale des matériaux granulaires étudiée dans le cadre de ce projet, le matériau doit être compris à l'intérieur du fuseau granulaire défini par la norme.

II.3 Rôle de la couche de fondation

II.3.1 Rôle mécanique

Le rôle général des assises de chaussées, et de la couche de fondation en particulier, est de répartir les contraintes créées par les charges roulantes (ou éventuellement statiques) et de les amener à un niveau compatible avec les caractéristiques du terrain naturel sur lequel est établie la chaussée (Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985)

La couche de fondation est le support structural de la route et sert principalement à supporter les contraintes induites par les véhicules lourds (Tannant & Regensburg, 2001).

Toute charge (roulante ou statique) applique à la chaussée une contrainte verticale, qui se transmet dans toute l'épaisseur de celle-ci, jusqu'au sol-support. A chaque niveau, il est possible, connaissant les caractéristiques des différentes couches (notamment l'épaisseur et le module de rigidité ou module de Young E) de connaître les contraintes, verticales et horizontales, et les déformations, créées par la charge en surface.

Il est évidemment nécessaire qu'en tout point, les qualités mécaniques des différentes couches soient telles que contraintes et déformations restent inférieures aux limites que les matériaux correspondants peuvent admettre, afin qu'il n'y ait ni déformation permanente, ni rupture (Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985).

Il faut préciser cependant que la couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables ; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que la couche de fondation, vu que les contraintes et les déformations auxquelles est soumise cette dernière conduisent à un niveau de qualité mécanique moindre que celui de la couche de base (Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985).

II.3.2 Rôle lors de l'exécution de la route

La couche de fondation sert provisoirement de couche de roulement lors de la construction de la route (renforcement sous circulation et/ou circulation de chantier) ; Elle fournit un support bien nivelé pour la couche de base puis pour les couches de surface, et elle fournit également un support de portance suffisant pour le compactage de la couche de surface.

II.3.3 Rôle drainant

La granulométrie grossière des matériaux utilisés pour la couche de fondation permet de diriger les eaux d'infiltrations vers les drains en bord de route, et une pente transversale de 2 à 4 % est recommandée pour faciliter la déviation (Douglas, 2016).

II.3.4 Rôle thermique

Un meilleur drainage de l'eau permet de réduire les volumes d'eau présents dans la structure et ainsi de limiter les déformations lors des périodes de gel-dégel, mais aussi la formation de lentilles de glaces (Tannant & Regensburg, 2001).

II.4 Cas des couches de fondation en GNT

II.4.1 Rôle des couches de fondation en GNT

Les matériaux constitutifs des assises non traitées sont des granulats à granulométrie continue, appelés graves, dont le calibre maximum dépend de la nature et de l'épaisseur de la couche (Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985).

La granulométrie d'une couche de fondation en GNT permet d'éviter la migration des particules de la surface de roulement. Les GNT grossières permettent à l'eau d'être évacuée, tout en constituant un bloc avec suffisamment de fines liées au reste des granulats pour empêcher les particules fines de migrer à travers la couche (Douglas, 2016).

Des filtres peuvent être utilisés pour réduire les risques de migration des particules.

Les assises non traitées doivent présenter, pour remplir leur rôle, une certaine rigidité et une résistance adéquate aux déformations permanentes.

II.4.2 Quelques caractéristiques de la couche de fondation en GNT

II.4.2.1 Rigidité

Les graves non traitées n'ont pas de rigidité propre, celle-ci dépendant de la rigidité de la couche-support. On estime généralement que le module d'une grave non traitée est de l'ordre de 3 à 4 fois celui de la couche-support (Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985)

II.4.2.2 Granulométrie

Thom et Brown (1988) ont montré que l'effet de la granulométrie varie selon la compacité. Dawson et al. (1996) ont montré que l'effet de la granulométrie est beaucoup plus important que la compacité. Une modification de la granulométrie qui entraîne une augmentation de la densité relative, pour un même effort de compactage, provoque une diminution de la déformation permanente. Pour Lekarp et al. (2000), l'augmentation de la densité pour un matériau granulaire composé de granulats anguleux provoque des diminutions très importantes de la déformation permanente alors qu'il est moins important pour un granulat arrondi.

II.4.2.3 Résistance aux déformations permanentes

Cette qualité correspond à une bonne résistance au poinçonnement, que l'on appelle aussi stabilité, permettant à la couche de supporter sans déformation notable les contraintes de cisaillement transmises à travers la couche de surface, et, à un moindre degré, à travers la couche de base.

Une couche de fondation en grave non traitée se comporte comme un solide élastique, pour lequel existe une déformation relative maximale ϵ au de-delà de laquelle la couche subirait des déformations permanentes irréversibles, ce qui conduirait à des désordres plus ou moins importants dans la chaussée.

L'aspect de l'évaluation de la rigidité d'une assise en grave non traitée amène à considérer la rigidité d'un sol-support ; or, la qualité de celui-ci est généralement estimée d'après son indice portant CBR. Il est donc utile d'avoir une équivalence entre CBR et E ; plusieurs auteurs ont proposé diverses formules ; par exemple, G. Jeuffroy (1985) a indiqué :

$$E = 6.5 \times CBR^{0.65} MPa$$

Le laboratoire Shell d'Amsterdam a avancé l'équivalence :

$$E = 10 \times CBR MPa$$

Celle-ci donne probablement des valeurs excessives de E pour des indices CBR relativement faibles.

En unifiant divers résultats, C. Régis a utilisé à partir de 1972 la formule moyenne suivante :

$$E = 0.85 \times CBR^{0.825} MPa$$

Le Laboratoire Central de Ponts et Chaussées emploie depuis 1985 la formule simplifiée suivante :

$$E = 5 \times CBR MPa$$

Les deux dernières formules sont assez proches. A titre d'exemple :

$$CBR = 3 \Rightarrow E = 20 MPa \text{ (Régis)}, E = 15 MPa \text{ (LCPC)}$$

$$CBR = 5 \Rightarrow E = 30 MPa \text{ (Régis)}, E = 25 MPa \text{ (LCPC)}$$

$$CBR = 10 \Rightarrow E = 50 MPa \text{ (Régis)}, E = 50 MPa \text{ (LCPC)}$$

(Jeuffroy & Sauterey, Cours de routes, 1985)

II.5 Conclusion

Avec un bon dimensionnement et une bonne granulométrie, les qualités de rigidité et de résistance aux déformations permanentes de la fondation en GNT se conservent sous l'effet du trafic, ce qui signifie que les granulats résistent aux effets de choc qui tendent à les fracturer, et à les user par frottement réciproque (attrition).

La couche de fondation assure donc une résistance de la chaussée face aux conditions climatiques ; à l'eau, au gel, aux fortes températures et aux contraintes mécaniques qui s'exercent soit directement sur elle ou sur les couches supérieures.

CHAPITRE III

GRANULOMETRIE DE LA

COUCHE DE FONDATION

SELON LES REFERENCES

III. GRANULOMETRIE DE LA COUCHE DE FONDATION SELON LES REFERENCES

III.1 Introduction

Les granulométries des couches d'assise varient toutes selon plusieurs paramètres, le principal étant la nature du matériau prévu pour la mise en œuvre, lui-même défini selon le type de trafic, le climat, la nature du sol support et les moyens à disposition. Beaucoup d'assises sont traitées aux liants (hydrocarbonés ou hydrauliques), mais l'un des types d'assises les plus usités est celui constitué de graves non traitées, du fait de la rapidité d'exécution et de la disponibilité des matériaux. Dans ce chapitre, nous présentons certains fuseaux spécifiques pour la réalisation de couches de fondation avec des GNT selon différentes références. Il est nécessaire de faire des choix quant aux sources testées, mais principalement quant aux diverses granulométries.

III.2 Selon la norme NF EN 13285 (2010)

Les couches d'assises (base et fondation) de classe 0/20 doivent respecter deux fuseaux granulométriques selon leurs caractéristiques intrinsèques.

III.2.1 Dans le cas Micro-Deval ≤ 35 % et Los Angeles ≤ 40 %

Tableau III.1 : Passants définis par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec LA ≤ 40 et MD ≤ 35

Tamis		Pourcentage en masse passant à :							
		1,4D : 28 mm	D : 20 mm	10 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,063 mm
Spécification	max	100	99	85	65	50	40	35	9
	min		85	55	35	22	15	10	4
Valeur déclarée	max			77	57	42	33	30	
	min			63	43	30	22	15	

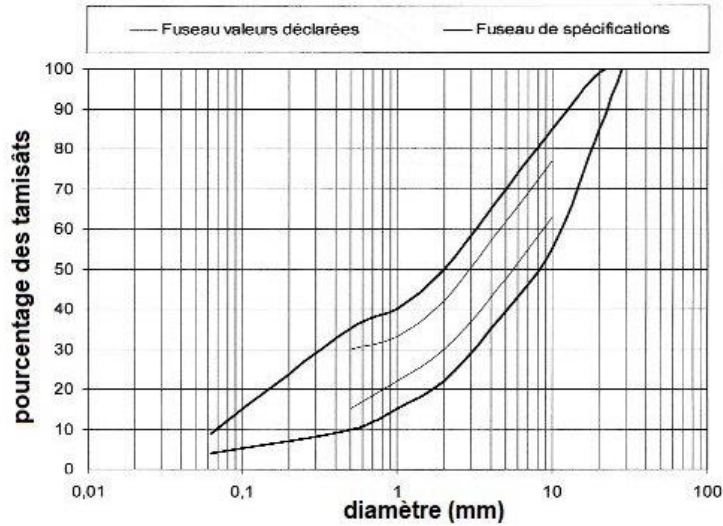


Figure III.1 : Fuseau défini par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $MD \leq 35$ et $LA \leq 40$

III.2.2 Dans le cas Micro-Deval $> 35\%$ et Los Angeles $> 40\%$

Tableau III.2 : Passants définis par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $LA > 40$ et $MD > 35$

Tamis		Pourcentage en masse passant à :								
		2D : 40 mm	1,4 D : 28 mm	D : 20 mm	10 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,063 mm
Spécification	max	100	100	99	85	65	50	40	35	15
	min		90	80	55	35	22	15	10	8
Valeur déclarée	max				77	57	42	33	30	
	min				63	43	30	22	15	

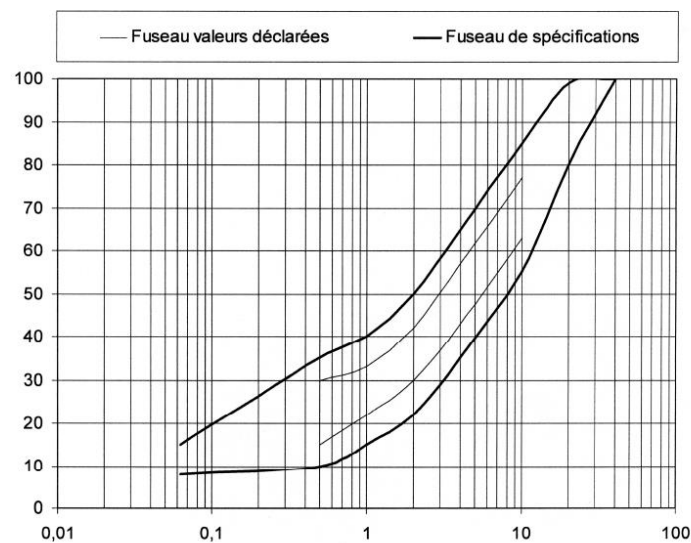


Figure III.2 : Fuseau défini par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec $LA > 40$ et $MD > 35$

III.3 Selon le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, Fascicule 3 (CTTP, 2001)

Les GNT sont, selon le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, utilisées pour deux types d'assises :

- Les couches d'assises de base et de fondation pour le réseau RP 2 (réseau principal 2).
- Les couches de fondation pour le réseau de niveau 1 (RP1).

Les différences entre RP1 et RP2 reposent dans le type de trafic auquel sera soumise la chaussée, la zone climatique, la résistance du sol support, la durée de vie de la chaussée et son taux d'accroissement.

Les dimensionnements de chaque type de chaussée sont précisés dans le catalogue.

Deux granulométries sont indiquées pour des couches de fondation en GNT, selon qu'il s'agisse de classe 0/20 ou de classe 0/31.5 :

III.3.1 Classe 0/20

Tableau III.3 : Passants des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/20) selon le CDCN (fascicule 3)

Tamis (mm)	31.5	20	10	6.3	4	2	0.5	0.2	0.08	
Tamisât (%)	Min	100	85	55	42	32	22	11	7	4
	Max	100	99	82	70	60	49	30	20	10

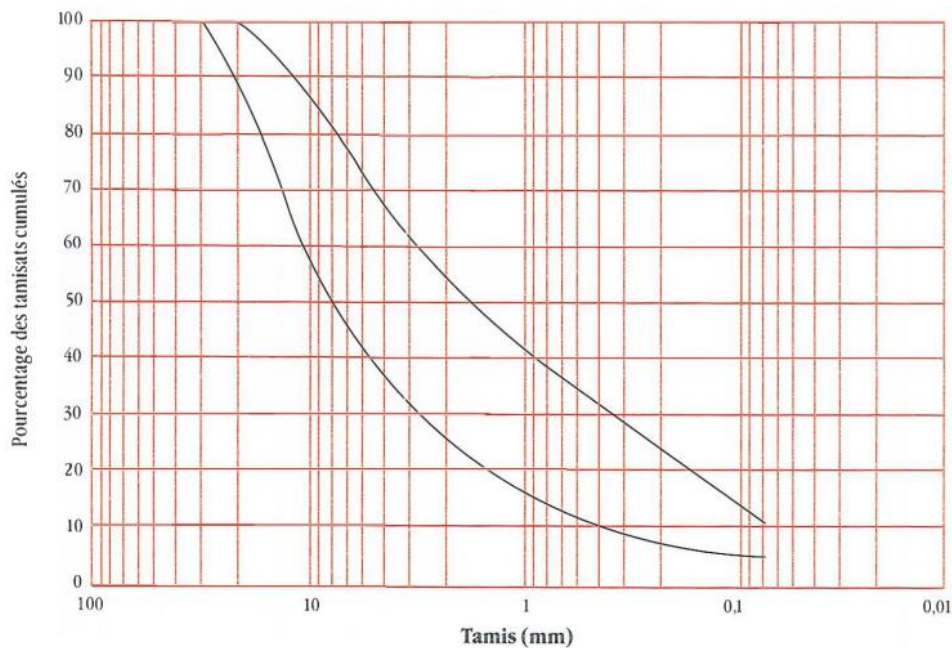


Figure III.3 : Fuseau des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/20) selon le CDCN (fascicule 3)

III.3.2 Classe 0/31.5

Tableau III.4 : Passants des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/31.5)
selon le CDCN (fascicule 3)

Tamis (mm)	40	31.5	20	10	6.3	4	2	0.5	0.2	0.08	
Tamisât (%)	Min	100	85	62	40	31	25	18	10	6	4
	Max	100	99	90	70	60	52	43	27	18	10

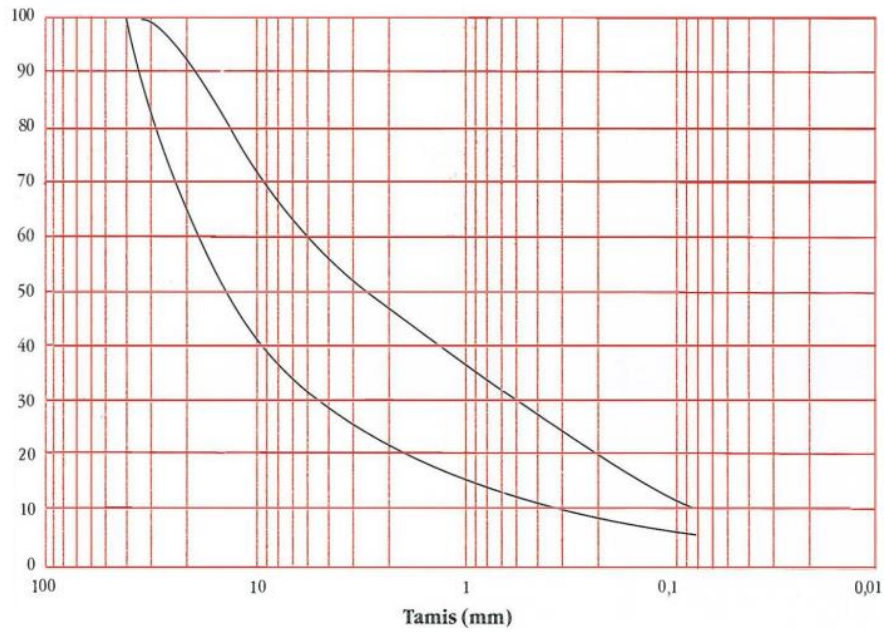


Figure III.4 : Fuseau des GNT pour une couche d'assise de chaussée (fuseau 0/31.5)
selon le CDCN (fascicule 3)

III.4 Selon la norme québécoise NQ-2560-114 (BNQ 2002)

III.4.1 Passant et fuseau granulométrique

Pour les matériaux granulaires 0/20 utilisés pour des couches de fondation, les passants sont présentés dans le tableau III.5, et le fuseau correspondant dans la figure III.6.

Tableau III.5 : Passants minimums et maximums définis pour les MG20 par la norme NQ-2560-114

Diamètre (mm)	% passant minimum	% passant maximum
31,5	100	100
20	90	100
14	68	93
10	-	-
5	35	60
2,5	-	-
1,25	19	38
0,630	-	-
0,315	9	17
0,160	-	-
0,080	2	7

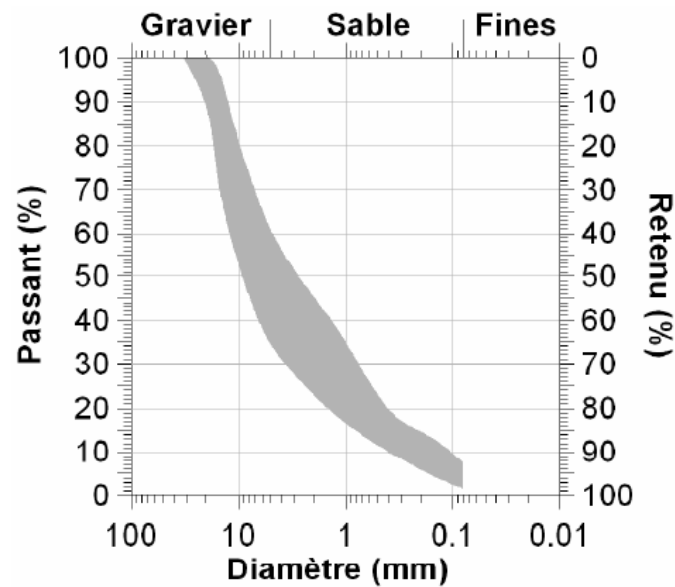


Figure III.6 : Fuseau défini par la norme NQ-2560-114 pour les couches de fondation

III.4.2 Spécifications

Selon cette norme, utilisée par le Ministère des Transports du Québec pour les granulats utilisés dans les ouvrages de génie civil, les exigences qui doivent être satisfaites afin qu'un granulats puisse être utilisé comme matériau granulaire pour les fondations sont les suivantes :

Caractéristiques intrinsèques :

Granulats au maximum de catégorie 5. (Micro-Deval < 35 % ; Los Angeles < 50 % ; Micro Deval + Los Angeles < 80 %).

Caractéristiques de fabrication :

Granulats au maximum de catégorie « e » (Pourcentage de fragmentation \geq 50%).

Caractéristiques complémentaires :

Pourcentage de matière organique \leq 0,8 %.

Valeur au bleu de méthylène (VB) \leq 0,20 cm³/g.

III.5 Selon la norme ASTM D 1241 – 00 (2015)

III.5.1 Passants et fuseaux granulométriques

La norme ASTM D 1241 – 00 (2015), ainsi que la norme AASHTO M 147 (2017) qui la reprend (American Association of State Highway and Transportation Officials) désigne les couches d'assises de chaussées par les termes bases non stables et bases granulaires (*unstable bases/granular bases*). Ils sont surtout utilisés pour les routes en béton et en asphalte, mais peuvent aussi être prévus pour d'autres types de chaussées.

Tableau III.6 : Passants des matériaux granulaires pour assises de chaussées selon la norme (ASTM 1241 - 00)

Diamètre des tamis	Pourcentage en masse de passant					
	Type I				Type II	
	Gradation A	Gradation B	Gradation C	Gradation D	Gradation E	Gradation F
2-in. (50-mm)	100	100
1-in. (25.0-mm)	...	75 to 95	100	100	100	100
3/8-in. (9.5-mm)	30 to 65	40 to 75	50 to 85	60 to 100
No. 4 (4.75-mm)	25 to 55	30 to 60	35 to 65	50 to 85	55 to 100	70 to 100
No. 10 (2.00-mm)	15 to 40	20 to 45	25 to 50	40 to 70	40 to 100	55 to 100
No. 40 (425- μ m)	8 to 20	15 to 30	15 to 30	25 to 45	20 to 50	30 to 70
No. 200 (75- μ m)	2 to 8	5 to 15	5 to 15	8 to 15	6 to 15	8 to 15

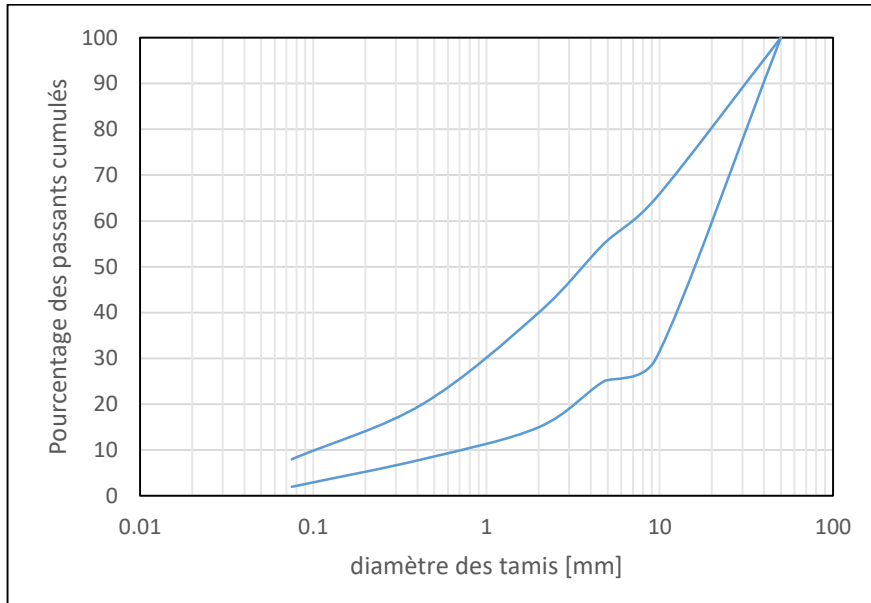


Figure III.7 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation A)

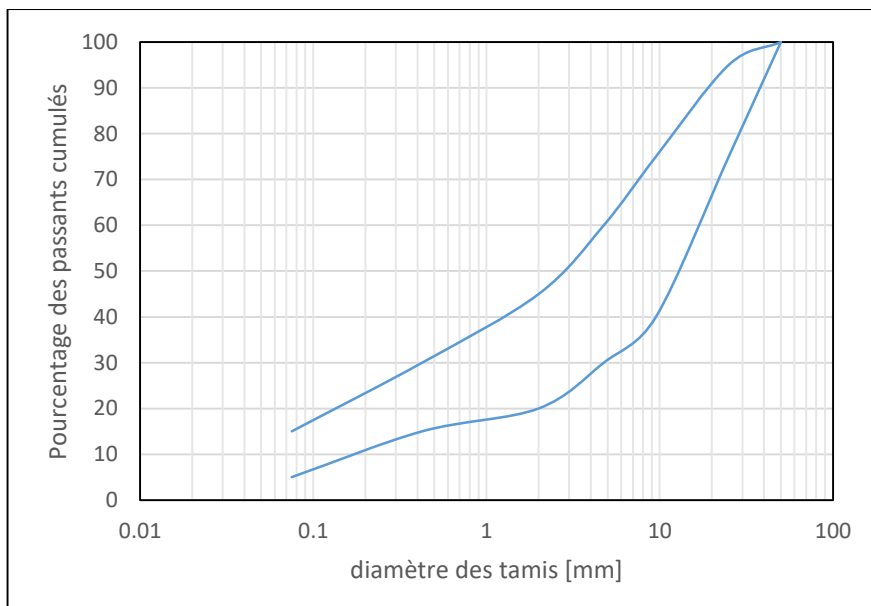


Figure III.8 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation B)

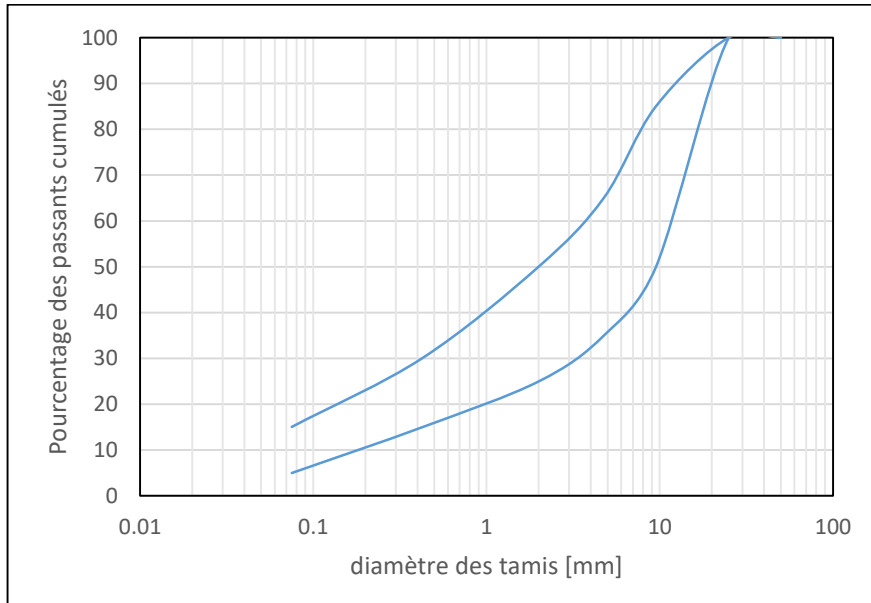


Figure III.9 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation C)

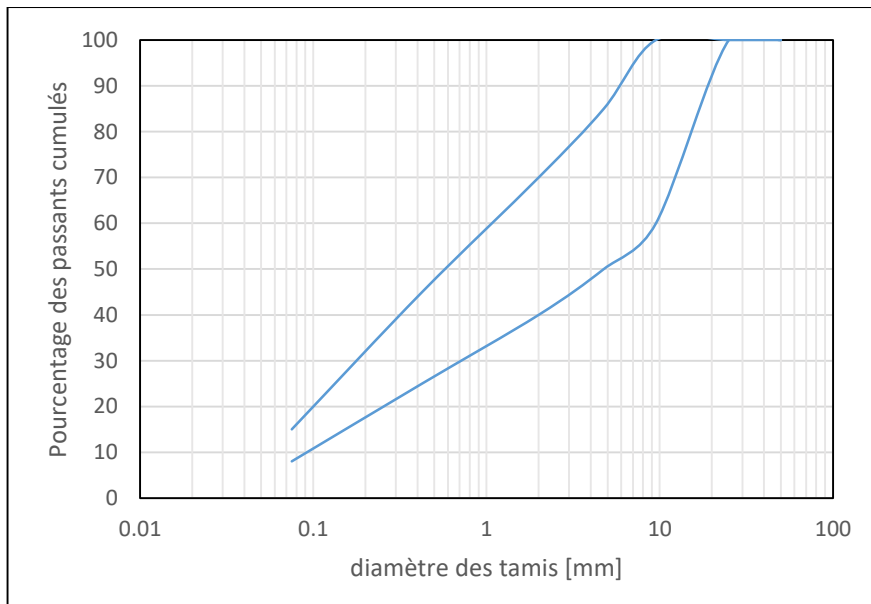


Figure III.10 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation D)

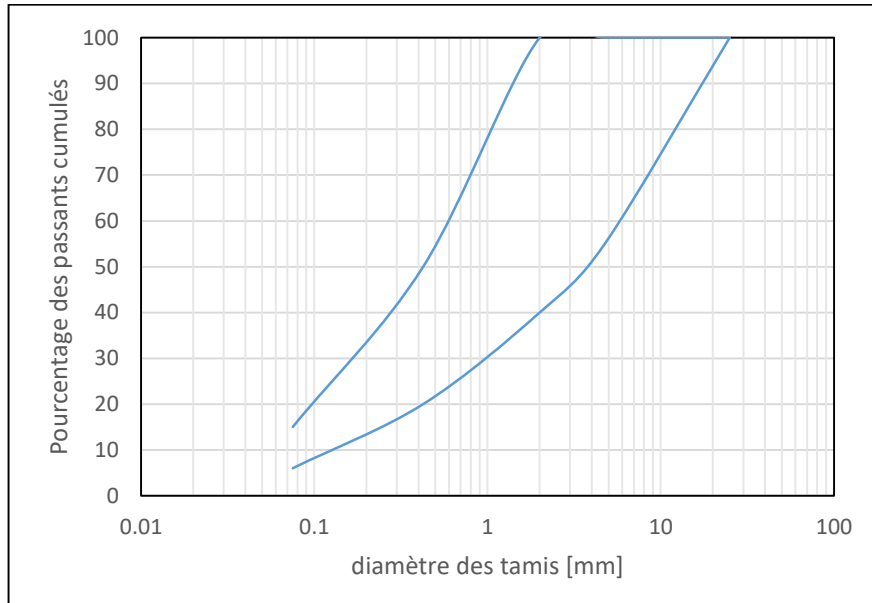


Figure III.11 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation E)

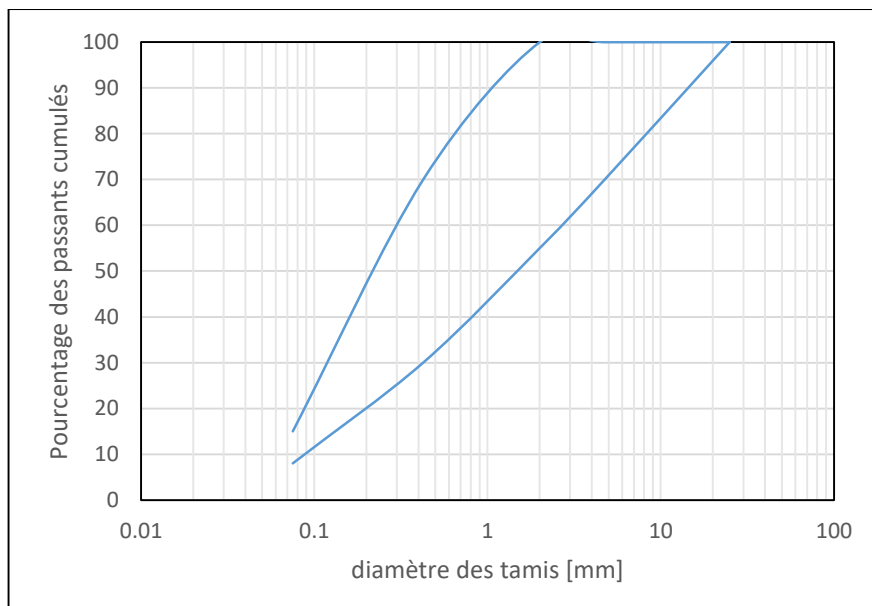


Figure III.12 : Fuseau granulométrique pour les couches de fondation selon la norme **ASTM 1241 – 00** (Gradation F)

III.5.2 Spécifications

Les types présentés dans le tableau III.6 se décrivent comme suit :

Type 1 : Mélanges constitués de cailloux, de gravier, de laitier, de sable naturel ou broyé, et de fines particules minérales passant le tamis No. 200 (0.075 mm). Ce type se conforme aux gradations A B C ou D.

Type 2 : Mélanges consistant en sable naturel ou broyé avec de fines particules minérales passant à travers le tamis No. 200 (0.075 mm), avec ou sans cailloux, gravier et laitier. Ce type se conforme aux gradations E et F.

De manière générale, les GNT doivent suivre les critères suivants :

- Moins de 10% de passant au tamis No. 200 (0.074 mm)
- Indice de plasticité ≤ 6 et limite de liquidité ≤ 25 .
- Le diamètre maximal des granulats ne doit pas dépasser un tiers de l'épaisseur de la couche.
- Los Angeles ≤ 50 %
- Perméabilité approximative de 150 pieds/jour (45.72 m/jour) et ne dépassant pas 350 pieds/jour (106.68 m/jour)

Limiter la quantité de fines est le plus important des critères afin d'éviter le phénomène d'érosion et l'action du gèle.

Les critères liés à la granulométrie sont strictement respectés par la gradation A (Type I).

Cependant, la norme ASTM prévoit par définition de larges fuseaux pour les GNT à utiliser en couche de fondation.

Contrairement aux couches de surface et de base, qu'il n'est possible de dimensionner qu'avec certaines des gradations mentionnées, une couche de fondation peut se voir attribuer n'importe quel fuseau parmi les 5 décrits (Type I : gradations A B C et D, Type II : gradations E et F).

III.6 Selon le Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984)

III.6.1 Passants et fuseau

Le Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics a préconisé, en 1984, dans le cas de couches d'assise en concassés de 0/40 et 0/31.5, le tableau des passants et les fuseaux suivants :

Tableau III.7 : Passants pour couche d'assise de chaussée dans le cas de concassés 0/31.5 et 0/40 selon le CEBTP (1984)

	% passant	
	0/31,5	0/40
50 mm.....		100
40 mm.....	100	95-100
31,5 mm.....	95-100	85- 97
20 mm.....	64- 90	65- 90
10 mm.....	40- 70	40- 75
6,3 mm.....	30- 60	30- 63
2 mm.....	20- 42	20- 45
0,5 mm.....	10- 26	12- 30
80 µm.....	2(4)- 10	4- 12

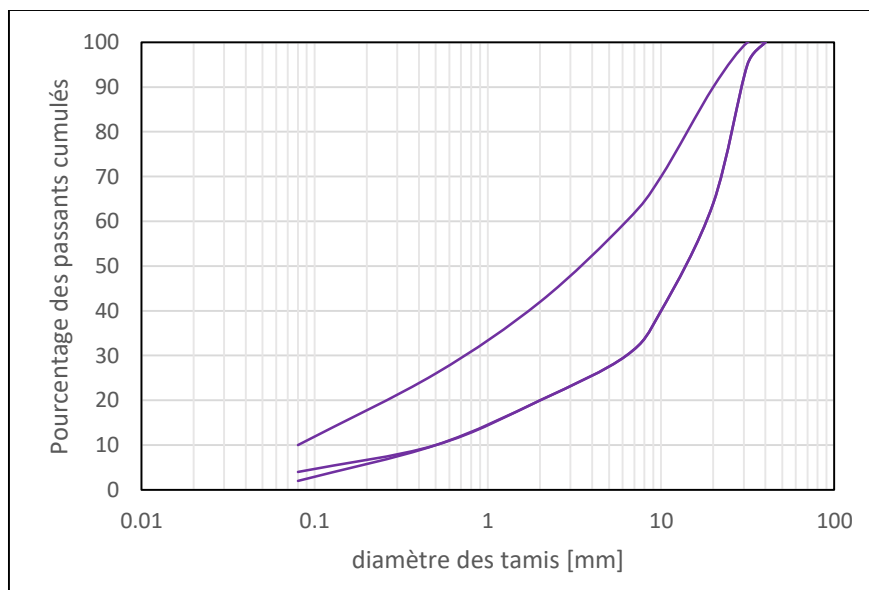


Figure III.13 : Fuseau granulométrique pour les couches d'assise (concassés 0/31.5) selon le CEBTP (1984)

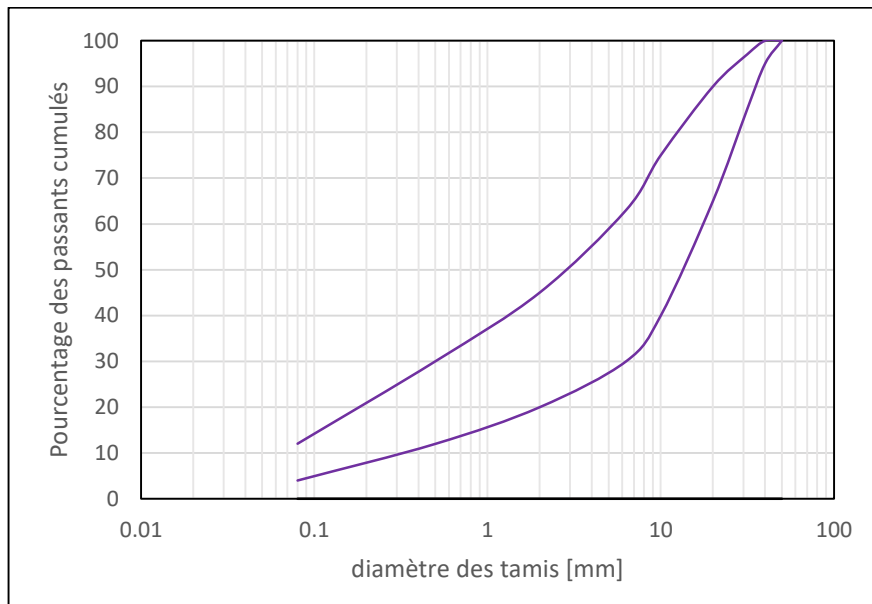


Figure III.14 : Fuseau granulométrique pour les couches d'assise (concassés 0/40) selon le CEBTP (1984)

III.6.2 Spécifications

Les concassés sont décrits comme du tout-venant provenant de l'extraction en carrière de roches dures ou du concassage, après criblage, de graves alluvionnaires à gros éléments.

Il est préconisé que certains paramètres aient des valeurs définies :

Indice de concassage :

IC = 100 % (dans la couche de base pour une chaussée à fort trafic) ;

IC = 80 % et 60 % (pour des chaussées à moyen ou faible trafic).

Indice de plasticité :

IP \leq 6 (trafic faible et moyen)

IP = 0 fort trafic

Equivalent de sable :

ES \geq 30 (faible et moyen trafic)

ES \geq 40 (fort trafic)

Il est possible également de mettre en œuvre une couche unique base/fondation plutôt que deux couches séparées base/fondation.

III.7. Récapitulatif et comparaison

Nous effectuons une comparaison de quatre des fuseaux de classe MG20 cités dans ce chapitre, il s'agit des fuseaux des normes :

- ASTM D 1241 – 00 (Gradation A), 2015 ;
- NQ-2560-114 (BNQ), 2002 ;
- CTPP, 2001 ;
- NF EN 13285, 2010.

Ces quatre fuseaux sont superposés dans la figure qui suit :

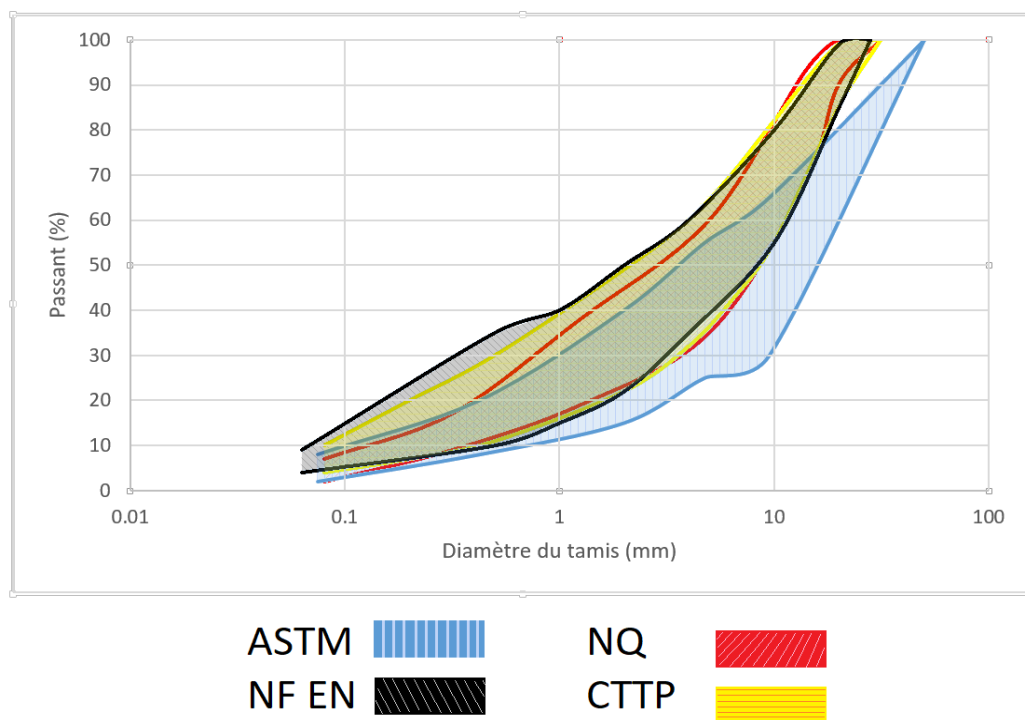


Figure III.15 : Comparaison des fuseaux ASTM, NF EN, NQ et CTPP

Nous pouvons émettre les observations suivantes :

La norme au fuseau le plus étroit est la norme Québécoise, suivie par la norme du CTPP.

La norme au fuseau le plus large est la norme ASTM.

La norme ASTM (gradation A) est celle qui exige les plus grandes quantités de graviers par rapport aux autres normes, qui prévoient davantage de sable.

La norme NF EN est la plus exigeante pour les quantités de sable au détriment du gravier.

La norme NF EN a un domaine de définition des fines plus restreint que les autres normes.

III.8 Conclusion

Nous avons pu voir que de nombreuses normes et organismes recommandent des fuseaux qui varient plus ou moins pour les couches de fondation. Ces différences résident souvent dans les besoins de l'Etat ou de l'organisme pour la performance attendue de ses routes, selon les conditions environnementales et géologiques, ainsi que la qualité des matériaux à disposition dans le pays. C'est ainsi que la norme ASTM par exemple définit plusieurs fuseaux larges, du fait de son application dans un grand pays au climat et au territoire d'une très grande variété, et que la norme québécoise présente un fuseau plus étroit et strict en raison des conditions plus délicates et spécifiques du Québec.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE VI

IDENTIFICATION DES

MATERIAUX

IV.1 Introduction

Les effets de la granulométrie sur le comportement des matériaux granulaires sont divers. Beaucoup d'études ont été menées afin d'analyser son effet sur la sensibilité des matériaux à plusieurs types de contraintes mécaniques et environnementales, mais l'effet induit sur la portance est assez rarement traité dans la recherche. Ce travail vise à compléter cette lacune et à apporter une contribution sur le thème de la granulométrie optimale des GNT pour une meilleure portance des couches de fondation de chaussées.

IV.2 Description du travail effectué

Ce projet a pour objet d'étude des graves non traitées (GNT) constituées de gravier, de sable et de fines. Elles sont mélangées selon plusieurs configurations granulométriques prédéfinies, puis sont compactées à l'optimum Proctor afin de subir des poinçonnements CBR qui déterminent lesquelles des configurations permettent d'obtenir des indices CBR plus élevées que les autres.

Les différentes granulométries choisies sont restreintes aux limites du fuseau de spécification décrit par la norme NF EN 13285 relative au dimensionnement des couches d'assises de chaussées.

Des essais d'identification, puis des essais de compactage Proctor normal et modifié sont effectués dans le laboratoire pédagogique de mécanique des sols, ensuite des essais CBR sont réalisés avec les mêmes GNT au sein du laboratoire de géo-matériaux, environnement et aménagement (LGEA)

Au terme de ce travail, seront tirées les conclusions adéquates aux résultats trouvés, puis seront prescrites certaines granulométries plutôt que d'autres pour mettre en œuvre des couches de fondation de chaussée.

IV.3 Description des matériaux granulaires de l'étude

Le matériau utilisé est constitué de graves concassées issues de la carrière de Chelghoum Laid, de la wilaya de Mila. Sont mises à disposition les classes initiales (0-3), (3-8), (8-15) et (15-25). Elles sont tamisées à sec, puis lavées et étuvées, pour obtenir les classes suivantes :

Les classes du gravier : (25 - 20) ; (20 - 10) ; (10 - 4) ; (4 - 2) ;

Les classes du sable : (2 - 1) ; (1 - 0.5) ; (0.5 - 0.063) ;

Et enfin les fines : (0.063 - 0).

Les graves sont d'aspect angulaire, et les fines sont d'un aspect blanchâtres et s'apparentent à du filler de calcaire.



Figure IV.1 : Classes 25-20 et 20-10 du matériau utilisé



Figure IV.2 : Classes 10-4 et 4-2 du matériau utilisé



Figure IV.3 : Classes 1-0.5 et 0.5-0.063 du matériau utilisé



Figure IV.4 : Fines (0.063-0) du matériau utilisé

Chapitre IV : Identification des matériaux

Les essais d'identification réalisés dans le cadre du présent travail sont les suivants :

- Essai N° 01 : Teneur en eau
- Essai N° 02 : Masse volumique absolue au pycnomètre.
- Essai N° 03 : Los Angeles.
- Essai N° 04 : Micro-Deval (M_{DE}).
- Essai N° 05 : Friabilité des sables.
- Essai N° 06 : Fragmentabilité des matériaux rocheux.
- Essai N° 07 : Dégradabilité des matériaux rocheux.

IV.4 Essais d'identification

IV.4.1.1 Essai N° 01 : Teneur en eau (NF P 94-050)

Définition, objectif et but de l'essai

La teneur en eau pondérale d'un sol (w), appelée généralement teneur en eau, exprimée en pourcentage (%), est le rapport entre la masse de l'eau évaporée par séchage d'un volume de sol ramenée à la masse sèche de ce sol. L'essai permet de renseigner sur l'état d'humidité d'un matériau, de savoir la quantité d'eau existante dans un volume de sol donné relativement à la quantité des grains solides de ce même volume de sol.

Exécution de l'essai

- La masse (M) du matériau naturel à soumettre à l'essai est définie par la norme. Dans le tableau qui suit sont définies les masses retenues selon le diamètre du plus gros grain trouvé dans les classes de granulats utilisés.

Tableau IV.1 : Masses minimales de l'échantillon en fonction des diamètres des plus gros grains au sein du matériau utilisé

Classes	(0 – 3)	(3 – 8)	(8 – 15)	(15-25)
Dm du plus gros grain trouvés (mm)	5	8	25	25
Masse (kg)	0.3	0.5	3	5

- On met le matériau prélevé dans un récipient de masse connue M_1 . L'ensemble est immédiatement pesé ($M_2 = M + M_1$) ;

- Une fois le matériau sec, on détermine la masse M_3 de l'ensemble (récipient + matériau sec) et la teneur en eau est déterminée par un simple calcul).

Expression des résultats

La teneur en eau exprimée en pourcentage (%) est calculée par la relation suivante:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100 (\%)$$

M_w : masse de l'eau évaporée ; M_1 : Masse du récipient ;

M_2 : Masse du sol humide + masse du récipient ; M_s : masse du sol sec (après séchage) ;

M_3 : Masse du sol sec + masse du récipient.

IV.4.1.2 Résultats de l'essai N° 01 : Teneur en eau (NF P 94-050)

Les matériaux granulaires utilisés pour ce travail sont issus de granulats concassés de carrière, procurés dans un état sec durant une période de forte chaleur (septembre 2022 à Tizi-Ouzou), puis transportés dans des sacs en jute doublés par des sacs plastiques hermétiques. Il paraissait par appréciation tactile et visuelle que les matériaux étaient parfaitement secs, mais l'essai de teneur en eau a tout de même été réalisé afin de dissiper tout doute.

- 1 - Un échantillon initial de la classe (0 - 5) est pesé et est égal à 300 g
Après séchage, il est égal à 300 g. Aucun changement, donc le matériau est parfaitement sec.
- 2 - Un échantillon initial de la classe (3 - 10) est pesé et est égal à 800g.
Après séchage, il est égal à 800 g. Aucun changement, donc le matériau est parfaitement sec.
- 3 - Un échantillon initial de la classe (8 - 20) est pesé et est égal à 3000 g
Après séchage, il est égal à 3000 g. Aucun changement, donc le matériau est parfaitement sec.
- 4 - Un échantillon initial de la classe (15 - 25) est pesé et est égal à 5000 g
Après séchage, il est égal à 5000 g. Aucun changement, donc le matériau est parfaitement sec.

Conclusion : les matériaux granulaires utilisés pour le travail sont parfaitement secs (teneur en eau = 0%).

IV.4.2.1 Essai N° 2 : Masse volumique des particules solides ρ_s absolue **(Méthode du Pycnomètre à Eau, NF P 94-054)**

Définition, objectif et but de l'essai

La masse volumique des particules solides du sol (ρ) est le quotient de la masse sèche de ces particules (M_s) par leur volume (V_s).

Principe de l'essai

L'essai s'applique à tout échantillon de sol intact ou remanié dont la dimension des plus gros éléments est inférieure à 2 mm. Le principe consiste à sécher un échantillon de sol à l'étuve puis déterminer sa masse sèche par pesée (masse des particules et éléments solides). Le volume des particules et éléments solides est déduit également par pesée à l'aide d'un pycnomètre. Il permet de déterminer le volume des échantillons de forme irrégulière et de masse connue, tels que les granulats. Le principe repose sur le remplacement d'une certaine quantité de liquide du pycnomètre (eau généralement) par l'échantillon à étudier (plongé dans le pycnomètre).

Appareillage

- Une étuve - une balance de précision - un tamis de 2 mm d'ouvertures - pycnomètre de volume minimal 50 cm munis de bouchon (figure IV.5) - une réserve de 3 litres d'eau distillée (deminéralisée) – Un réchaud permettant l'ébullition de l'eau dans le pycnomètre.



Figure IV.5 : Pycnomètre en verre utilisé pour l'essai de la masse volumique

Exécution de l'essai

On tamise une partie du sol à étudier au tamis de 2 mm. On prend un échantillon d'environ 50 g du tamisât précédent et le mettre dans une coupelle de masse connue (M). L'ensemble est introduit dans une étuve dont la température est réglée à 105°C. Le séchage dure jour.

Le pycnomètre et son bouchon secs et propres sont pesés (M1), ensuite, l'échantillon est soigneusement introduit dans le pycnomètre. L'ensemble (pycnomètre + échantillon + bouchon) est pesé (M2). Le ballon du pycnomètre est ensuite rempli d'eau distillée ou déminéralisée maintenue à la température ambiante. Afin d'éliminer toute bulle d'air, on procède à l'ébullition à la plaque chauffante. L'ensemble dans le pycnomètre est porté à ébullition pendant au moins une heure.

Une fois tout est désaéré, le bouchon est placé avec son tube repère sur le ballon du pycnomètre avec de l'eau distillée ou déminéralisée jusqu'au repère. Au bout de 30 min, le pycnomètre (essuyé en utilisant une serviette sèche) est pesé (Ms). On vide et on nettoie le pycnomètre et on remplit d'eau déminéralisée jusqu'au repère du bouchon. Au bout de 30 min, le niveau est à nouveau en coïncidence avec le repère. On essuie l'ensemble, et on le pèse (M4).

Expression des résultats

La masse volumique des particules solides est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{\left(\frac{M_s}{\rho_s}\right)}$$

Le volume des particules solides est assimilé au volume de l'eau éjectée lorsqu'on immerge ces particules dans un pycnomètre rempli d'eau ($V_s = V_w$) et donc : $\frac{M_s}{\rho_s} \leftrightarrow \frac{M_w}{\rho_w}$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{\left(\frac{M_s}{\rho_s}\right)} = \frac{M_s}{\left(\frac{M_w}{\rho_w}\right)} = \frac{\rho_w \cdot M_s}{M_w}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_w (M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)}$$

M1 : masse du pycnomètre vide + bouchon ;

M2 : masse du pycnomètre + particules solides + bouchon ;

M3 : masse du pycnomètre + particules solides + eau (rajoutée jusqu'au remplissage du pycnomètre) + bouchon ;

M4 : masse du pycnomètre + eau (eau totale nécessaire à remplir le pycnomètre) + bouchon ;

ρ_w : masse volumique de l'eau = 1000 kg/m³

M_s : masse des particules solides ;

M_w : masse de l'eau éjectée (masse d'un même volume que les particules solides).

La valeur de la masse volumique des particules solides est la moyenne arithmétique de deux à trois mesures effectuées sur deux à trois échantillons issus d'un même sol.

IV.4.2.2 Résultats de l'essai N° 2 : Masse volumique absolue (NF P 94-054)

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue

Paramètre	Valeur
Masse du pycnomètre vide + bouchon (M1)	208 g
Masse du pycnomètre + particules solides + bouchon (M2)	258 g
Masse du pycnomètre + particules solides + l'eau + bouchon (M3)	785 g
Masse du pycnomètre + eau + bouchon (M4)	758 g
Masse de l'eau de même volume que les particules solides (M4-M1+M2-M3)	23 g
Masse volumique de l'eau ρ_w	1 g/cm ³

$$\rho_s = \frac{\rho_w (M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)} = \frac{1 (258 - 208)}{(758 - 208 + 258 - 785)} = \frac{50}{23}$$

$$\rho_s = 2.1739 \text{ g/cm}^3$$

IV.4.3.1 Essai N°3 : Los Angeles (LA) (NF P 18-573)

Objectifs et but de l'essai

L'essai a pour objectif, la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs (dureté par rapport aux chocs) des GNT que nous utiliserons.

Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite d'un matériau, soumis aux chocs de boulets normalisés (boules en acier) dans la machine Los Angeles.



Figure IV.6 : Machine Los Angeles



Figure IV.7 : Une des boules utilisée pour la charge Los Angeles

Préparation du matériau

La masse M de l'échantillon nécessaire pour l'essai est de 5000 g.

Les classes granulaires sont choisies en fonction de la fraction prépondérante dans le matériau. Il s'agit des classes : (4 - 6.3) ; (6.3 - 10) et (10 - 14).

Exécution de l'essai

On introduit avec précaution les boulets dans l'appareil Los Angeles, ensuite l'échantillon à soumettre à l'essai (cet ordre évite l'écrasement des grains avant essai).

La machine est actionnée à 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33 tr/min. Au cours de l'essai, le matériau subira des chocs de boulets en rotation. A la fin de l'essai, le matériau est recueilli dans un bac placé sous l'appareil, en évitant toute perte de matériau. On tamise le matériau recueilli sur le tamis 1,6 mm. Le tamisage se fait en plusieurs parties pour l'assurer dans de bonnes conditions. Une fois tamisé, le refus au tamis de 1,6 mm est lavé. On égoutte et on sèche à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante M'.

Expression des résultats

Soient :

M : la masse sèche totale de l'échantillon soumise à l'essai (M = 5000 g);

M' : la masse sèche du refus au tamis de 1,6 mm (obtenue à la fin de l'essai).

La résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles par la formule suivante :

$$LA = \frac{(M - M')}{M} 100 = \frac{(5000 - M')}{5000} 100$$

Appréciation et interprétation des résultats

Tableau IV.3 : Valeurs de référence pour l'essai Los Angeles

Coefficient LA	Appréciation
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

Source: <http://idrop2.weebly.com/essais-mateacuteriaux-granulaires/essai-los-angeles>

Plus LA est élevé, moins le matériau est dur.

IV.4.3.2 Résultats de l'essai N°3 : Los Angeles (LA) (NF P 18-573)

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Los Angeles

Paramètre	Valeur		
Classe granulaire	4 – 6.3	6.3 – 10	10 – 14
Charge abrasive	3080 g	3960 g	4840 g
Masse sèche de l'échantillon (M)	5000 g		
Masse sèche du refus au tamis 1,6 mm (M')	3813.834 g	3750.435 g	3710.962 g
Masse sèche du tamisât au tamis 1,6 mm (M - M')	1186.166 g	1249.565	1289.038
Coefficient Los Angeles	23.72	24.99	25.78
Observation	Bon à moyen	bon à moyen	moyen à faible

Etant donné que pour la classe (10 - 14), le coefficient est très légèrement supérieur à la limite minimale définissant la classe, et que pour les classes (4 - 6.3) et (6.3 - 10) le matériau est très légèrement inférieur à la limite maximale définissant la classe, nous concluons ce qui suit :

Le matériau est classé dans son ensemble comme **moyen**.

IV.4.4.1 Essai N°4 : Micro-Deval (MD_E) (NF P18-572)

Objectifs et but de l'essai

L'essai a pour objectif, la mesure de la résistance à l'usure par attrition en présence d'eau (MD_E) des GNT utilisées.

Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite d'un matériau, soumis à l'usure des granulats par frottements dans la machine Micro-Deval dans des conditions bien définies.

Les classes (4 - 6.3) (6.3 - 10) et (10 - 14) sont également celles utilisées durant cet essai.



Figure IV.8 : Appareillage Micro-Deval



Figure IV.9 : Charge abrasive du Micro-Deval

Exécution de l'essai

La masse M de l'échantillon nécessaire pour l'essai est de 500 g pour les granulats (4 - 14 mm).

La charge abrasive est introduite avec précaution dans l'appareil Micro-Deval, suivie de l'échantillon à soumettre à l'essai (500 g).

On rajoute 2,5 litres d'eau. Les cylindres sont mis en rotation à une vitesse de 100 tr/min pendant 2h00 ou 12 000 tours. A la fin de l'essai, le granulat est recueilli, ainsi que la charge abrasive, dans un bac. On lave soigneusement l'intérieur du cylindre, en recueillant l'eau et les particules dans le bac. On emboîte les tamis de 8 mm et de 1.6 mm, on lave et on tamise manuellement l'ensemble (matériau + eau + billes en acier) sur les deux tamis dans un bac. La charge abrasive sera retenue sur le tamis de 8 mm avec peut être une partie du matériau,

une autre partie du matériau sera retenue sur le tamis de 1,6 mm et le reste (tamisât du tamis 1,6 mm) sera recueilli dans le bac. On retire la charge abrasive du matériau sur le tamis 8 mm. On sèche le refus au tamis 1.6 mm à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante. On pèse soigneusement ce refus de masse (M').

Expression des résultats

Soient:

M : La masse sèche totale de l'échantillon soumise à l'essai ($M = 500$ g pour les granulométries choisies) ;

M' : La masse sèche du refus au tamis de 1,6 mm (à la fin de l'essai) ;

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval à sec (M_{DS}) ou en présence d'eau (M_{DE}) par la formule suivante:

$$M_{DE} \text{ OU } M_{DS} = \frac{(M - M')}{M} 100$$

Appréciation et interprétation des résultats

Les essais LA et M_{DE} sont souvent combinés et réalisés pour tous matériaux routiers, ainsi l'appréciation des résultats peut être également combinée selon les résultats obtenus aux deux essais (tableau IV.5).

Tableau IV.5 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure. (Moron, BRGM)

Catégories	$LA + M_{DE}$	LA	M_{DE}
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

Catégorie A : Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, sauf couches de roulement à trafic important.

Catégorie B : Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, y compris les couches de roulement à trafic important.

Catégorie C : Matériau utilisable pour couches de fondations, et couches de base tout trafic.

Catégorie D : Matériau utilisable pour couches de fondations toutes chaussées, et couches de base pour chaussées à moyen trafic.

Catégorie E : Matériau utilisable pour couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

IV.4.4.2 Résultats de l'essai N°4 : Micro-Deval (MD_E) (NF P18-572)

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Micro-Deval et récapitulatif avec l'essai Los Angeles

Paramètre	Valeur		
Classe granulaire	4 – 6.3	6.3 – 10	10 – 14
Charge abrasive	2000 g	4000 g	5000 g
Masse sèche de l'échantillon (M)	500 g		
Masse sèche du refus au tamis 1,6 mm (M')	444.089 g	447.365	484.177
Masse sèche du tamisât au tamis 1,6 mm (M - M')	55.911 g	52.635	15.823
Coefficient Micro-Deval	11.1822	10.527	3.1646
Coefficient Los Angeles	23.72	24.99	25.78
Catégorie	catégorie B	catégorie C	catégorie C

Conclusion LA + MD_E

En prenant la catégorie la plus défavorable et la plus récurrente,

le matériau est de **catégorie C**.

Selon la norme, un matériau de catégorie C est utilisable pour les couches de fondations et les couches de base, pour tout type de trafic.

Ce matériau est donc adapté pour le travail prévu dans ce projet.

IV.4.5.1 Essai N°5 : Friabilité Des Sables (NF P 18-576)

Objectifs et but de l'essai

L'essai de friabilité des sables, exprimé par le coefficient de friabilité (F_s) permet de mesurer la résistance à la fragmentation des sables de classes granulométriques (0,2/2). En d'autres termes, il permet d'apprécier la résistance au trafic du chantier des matériaux sableux utilisés en couche de forme.

Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge (billes métalliques) en présence d'eau. L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai.

Préparation du matériau

Un mélange initial est préparé et est constitué de 2000 g de sable (0,2 - 2) mm ;

On homogénéise et on pèse un échantillon pour essai de masse $M = 500$ g.

Exécution de l'essai

- Introduction de la charge dans le cylindre d'essai (appareil Micro-Deval), puis des 500 g de matériau. On ajoute 2.5 litres d'eau.
- Le cylindre est mis en rotation à la vitesse de 100 tr/min 5 tr/min pendant 1500 tours ou 15 min.
- On verse ensuite soigneusement la totalité du contenu du cylindre sur deux tamis superposés de 8 mm (pour recueillir la charge abrasive) et de 0,1 mm.
- Lavage de l'ensemble sous un jet d'eau, jusqu'à eau claire, puis on enlève le tamis de 8 mm (contient les billes).
- Séchage du refus au tamis de 0,1 mm à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante. On tamise à sec le refus à 0,1 mm.
- On pèse le refus sur le tamis de 0,1 mm et on détermine sa masse m' (masse sèche).

Expression des résultats

La masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai est égale à :

$$m = M - m' = 500 - m'$$

Le coefficient de friabilité mesuré est exprimé par la formule suivante:

$$F_s = \frac{M - m'}{M} = \frac{500 - m'}{500} \times 100 = \frac{m'}{5}$$

La limite supérieure préconisée est de : **FS = 60**

IV.4.5.2 Résultats de l'essai N°5 : Friabilité des sables (NF P 18-576)

Tableau IV.7 : Récapitulatif des résultats de l'essai de friabilité des sables.

Paramètre	Valeur
Classe granulaire	(0.2 – 2)
Masse de l'échantillon brute	2000 g
Masse de l'échantillon (M)	500 g
Masse du refus sur le tamis de 0.1 mm (m')	257.6 g
Masse des éléments inférieurs à 0.1 mm (m)	$m = 500 - 257.6 = 242.4$ g
Coefficient de friabilité (Fs)	$FS = \frac{242.4}{5} = 48.48$

$$FS = 48.48$$

Conclusion

$$FS = 48.48 < 60$$

Le coefficient de friabilité de ce sable est inférieur à la limite autorisée, il est donc utilisable pour le travail prévu dans le cadre de ce projet.

IV.4.6.1 Essai N°6 : Fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066)

Objectifs et but de l'essai

L'essai de fragmentabilité, exprimé par le coefficient de fragmentabilité (FR) permet de traduire l'évolution continue de la granularité de certains matériaux rocheux depuis leur extraction jusqu'à leur mise en œuvre et qui, pour quelques-uns d'entre eux, se poursuit encore durant la vie des ouvrages dans lesquels sont utilisés

Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité d/D donnée, soumis à un pilonnage conventionnel.

Préparation du matériau

Un échantillon représentatif est prélevé des granulats et la fraction d/D qui sera soumise à l'essai est préparée. La fraction 8/25 est d'abord préparée à partir des classes 8/15 et 15/25, puis elle est tamisée pour obtenir la fraction 10/20.

Exécution de l'essai

On tamise la fraction 10/20 mm préalablement préparée au travers du tamis de 16 mm, on pèse et on note les refus à ces tamis. On mélange et on réhomogénéise tout le matériau (refus) pour reconstituer de nouveau la fraction d/D et on l'introduit dans le moule CBR. Les éléments sont arrangés manuellement en appliquant de légers coups sur les parois du moule et avoir la surface supérieure de l'échantillon aussi régulière que possible.

On applique à la surface de l'échantillon 100 coups de dame Proctor Normal distribués au mode opératoire de compactage dans l'essai Proctor. A la fin du pilonnage, tout le matériau contenu dans le moule CBR est récupéré et tamisé, les refus des tamis 1, 2, 5, 10 mm sont pesés.

Expression des résultats

En se basant sur les masses des refus déterminées au tamisage du matériau avant et après essais (avant et après pilonnage au moule CBR) sur les séries de tamis définies précédemment, on trace les courbes granulométriques correspondantes sur un même graphique.

On détermine sur ces courbes les valeurs respectives du D_{10} du matériau respectivement avant et après pilonnage (D_{10} : diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât).

Seuil retenu pour le coefficient : $FR = 7$

$FR < 7$: roche peu fragmentable

$FR > 7$: roche fragmentable

IV.4.6.2 Résultats de l'essai N°6 : Fragmentabilité des matériaux rocheux

(NF P 94-066)

Tableau IV.8 : résultats de l'essai de fragmentabilité

Masse sèche de l'échantillon : 2004 g				
Avant essai				
Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisâts cum (%)
20	0	0	0	100
16	1323	1323	66.018	33.982
10	681	2004	100	0
Après essai				
Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisâts cum (%)
10	1911	1911	96.272	3.728
5	37	1948	98.136	1.864
2	27	1975	99.496	0.504
1	10	1985	100	0

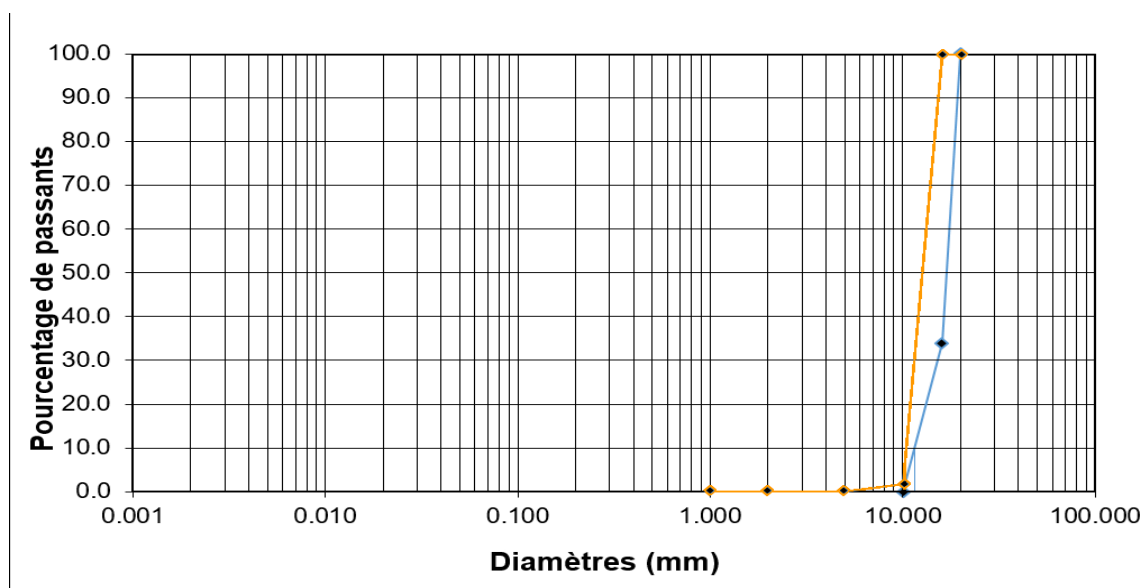


Figure IV.10 : Courbe granulométrique de l'échantillon avant et après fragmentation

De la courbe granulométrique, nous obtenons :

$$D_{10} = 12 \text{ (avant l'essai)} ; D_{10} = 10.5 \text{ (après l'essai)}$$

Nous obtenons donc le coefficient de fragmentabilité avec la formule suivante :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ avant pilonnage (avant essai)}}{D_{10} \text{ après pilonnage (après essai)}} = \frac{12}{10.5}$$

$$FR = 1.14$$

Conclusion

$$FR = 1.14 < 7$$

Il s'agit donc d'un matériau peu fragmentable.

IV.4.7.1 Essai N°7 : Dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-067)

Objectifs et but de l'essai

L'essai de dégradabilité traduit l'évolution continue des caractéristiques géotechniques des matériaux rocheux par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction. Il permet de qualifier la sensibilité de nos GNT aux sollicitations hydriques (risque d'évolution à long terme).

Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du diamètre d'un échantillon de granularité d/D donnée, soumis à quatre cycles (imbibition-séchage) conventionnels.

Préparation du matériau

Un échantillon représentatif des granulats est récupéré et la fraction d/D qui sera soumise à l'essai est préparée. D'abord la fraction 8/25 est préparée à partir des 8/15 et 15/25, puis est tamisée pour obtenir la fraction 10/20.

Exécution de l'essai

La fraction 10/20 mm est tamisée au travers du tamis de 16 mm, on pèse et on note les refus à ce tamis. On mélange et on réhomogénéise tout le matériau (refus) pour reconstituer de nouveau la fraction d/D et on la répartit dans le bac métallique. Celui-ci est alors placé alternativement quatre fois successives en immersion dans un grand bac, puis dans l'étuve réglée à 105 °C.

Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4ème cycle se termine par un séchage. La durée d'un cycle est de : 8 heures +1 heure d'immersion, et 16 heures + 1 heure de séchage. On procède au siphonage de l'eau restant dans le bac métallique (sans entrainement de particules du matériau) après chaque phase d'immersion et avant l'introduction de l'échantillon dans l'étuve. A la fin du 4ème cycle, on procède au tamisage à sec de l'échantillon à travers mes colonnes de tamis 1, 2, 5 et 10 mm.

On procède enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.

Expression des résultats

En se basant sur les masses des refus déterminées au tamisage du matériau avant et après essais (avant et après imbibition-séchage) sur les séries de tamis définies précédemment, on trace les courbes granulométriques correspondantes sur un même graphique.

On détermine sur ces courbes les valeurs respectives du D_{10} du matériau respectivement avant et après essais, (D_{10} diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât). On calcule le coefficient de dégradabilité DR en utilisant l'expression suivante:

$$DG = \frac{D_{10} \text{ avant le 1er cycle imbibition et séchage (avant essai)}}{D_{10} \text{ après le 4ème cycle imbibition et séchage (après essai)}}$$

Valeurs de référence: Seuils retenus: DG = 5 et 20

Tableau IV.9: Valeurs de références.

Valeur de DG	Commentaire
DG < 5	Matériaux rocheux peu dégradables
5 < DG < 20	Matériaux rocheux moyennement dégradables
DG > 20	Matériaux rocheux très dégradables

IV.4.7.2 Résultats de l'essai N°7 : Dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-067)

Les valeurs obtenues lors de l'essai de dégradabilité sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Résultats de l'essai de dégradabilité.

Masse sèche de l'échantillon : 2002 g				
Avant essai				
Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisâts cum (%)
20	0	0	0	100
16	590	590	29.471	70.529
10	1412	2002	100	0
Après essai				
Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cum (g)	Refus cum (%)	Tamisâts cum (%)
10	1934.7	1934.7	98.273	1.727
5	33.6	1968.3	99.980	0.02
2	0.3	1968.6	99.995	0.01
1	0.1	1968.7	100	0

La courbe granulométrique de l'échantillon avant et après sa dégradation est présentée dans le graphe suivant :

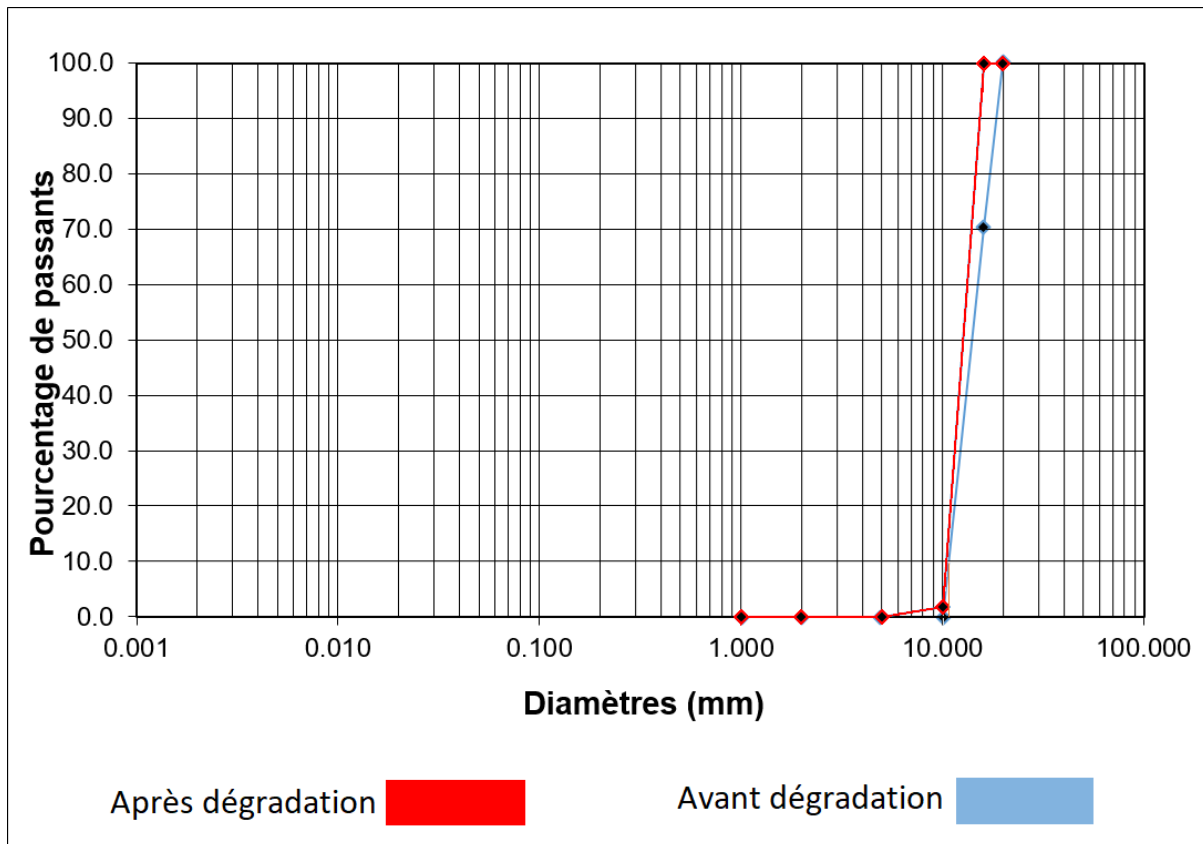


Figure IV.11 : Courbe granulométrique de l'échantillon avant et après dégradation

Des courbes, nous obtenons la valeur du D_{10} :

$$D_{10} = 10.9 \text{ (avant)} ; D_{10} = 10.55 \text{ (après)}$$

Le coefficient de dégradabilité est obtenu finalement avec la formule suivante :

$$DG = \frac{D_{10} \text{ avant le 1er cycle imbibition et séchage (avant essai)}}{D_{10} \text{ après le 4ème cycle imbibition et séchage (après essai)}}$$

$$DG = \frac{10.9}{10.55}$$

$$DG = 1.033$$

Conclusion

$$DG = 1.033 < 5$$

Il s'agit donc d'un matériau **peu dégradable**.

IV.5 Récapitulatif de tous les essais d'identification

1- GNT parfaitement sèches.

2- Masse volumique = 2.1739 g/cm^3

3- Matériau de catégorie C.

4- FS = 48.48, sable peu friable.

5- FR = 1.14, gravier peu fragmentable.

6- DG = 1.033, gravier peu dégradable.

IV.6 Conclusion

Les résultats des essais d'identification nous mènent à conclure que les GNT prélevées de la carrière de Chelghoum Laid sont bien adaptées pour des couches de fondation et pour le travail prévu dans ce projet.

CHAPITRE V

GRANULOMETRIES

V.1 Introduction

Afin de tester l'influence des classes granulaires sur la portance, nous avons choisi 6 granulométries différentes. Les granulométries choisies sont obtenues par les graviers (2/25), les sables (0.063/2) et les fines (0/0.063) avec différents pourcentages dans les limites du fuseau granulaire normalisé.

V.2 Justification des choix

Le choix de la granulométrie est un paramètre essentiel pour les granulats non traités (GNT) utilisées dans ce travail. Il dépend des valeurs des essais Los Angeles et Micro-Deval. Nous nous référons donc à la norme NF EN 13285 utilisant les GNT 0/20 avec un coefficient de LA inférieur à 40 et un coefficient de MDE inférieur ou égal à 35 et dont la valeur de LA + MDE est inférieure à 40 (tableau V.1).

Tableau V.1 : Pourcentages en masse passants décrit par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec LA inférieur à 40 et MDE inférieur ou égal à 35.

NF EN 13285:2010

GNT 0/20 avec LA ≤ 40 et MDE ≤ 35

Tamis		Pourcentage en masse passant à :							
		1,4D : 28 mm	D : 20 mm	10 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,063 mm
Spécification	max	100	99	85	65	50	40	35	9
	min		85	55	35	22	15	10	4
Valeur déclarée	max			77	57	42	33	30	
	min			63	43	30	22	15	

Le fuseau granulométrique de spécification, comprenant le fuseau des valeurs déclarées, est représenté sur la figure V.1.

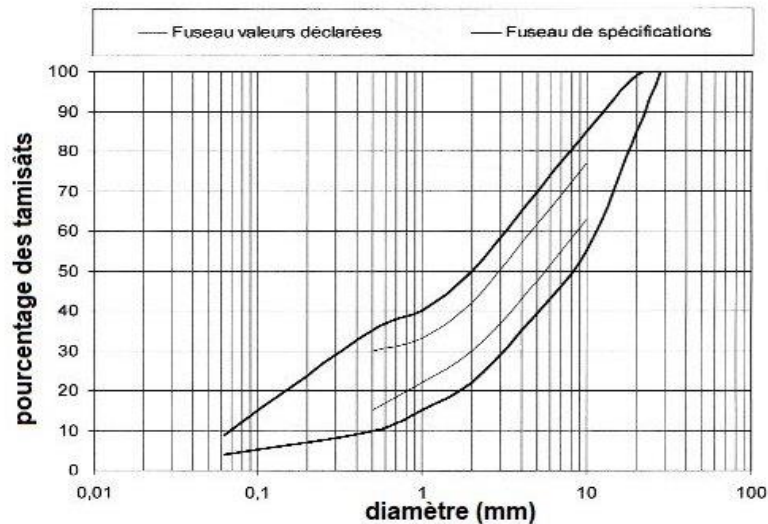


Figure V.1 : Fuseau de spécification et des valeurs déclarées décrits par la norme NF EN 13285 pour les GNT 0/20 avec LA inférieur à 40 et MDE inférieur ou égal à 35.

Les granulométries utilisées dans la partie expérimentale se résument comme suit :

- Granulométrie avec plus de gravier (**77 % de gravier**, 16.5 % de sable, 6.5 % de fines) ;
- Granulométrie avec plus de sable (50% de gravier, **43.5 % de sable**, 6.5 % de fines) ;
- Granulométrie avec plus de fines (63% de gravier, de 28% sable, de **9% de fines**) ;
- Granulométrie avec plus de fines et moins de sable (78% gravier, **13% sable**, **9% de fines**) ;
- Granulométrie avec plus de sable et moins de fines (50% gravier, **46% sable**, **4% de fines**) ;
- Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier (**50% gravier**, **41% sable**, **9% fines**).
- Granulométrie moyenne (**64% gravier**, **29% sable**, **6.5 % fines**).

Notons que les limites minimales pour le gravier sont 50%, pour le sable 13% et pour les fines 4%. Les limites maximales pour le gravier 77%, pour le sable 46% et pour les fines 9%

Ces choix vont permettre d'étudier l'influence de chacune des classes granulaires sur l'indice de portance Californien. On a fait varier les quantités de fines, de sable et de gravier dans les différentes granulométries de façon à trouver la granulométrie qui permettra d'obtenir la portance la plus élevée.

V.3 Choix des tamisâts pour les différentes granulométries

Les choix des différents tamisâts des graviers, sable et fines pour le tracé des courbes granulométriques sont présentés ci-dessous :

- Pour la granulométrie **moyenne** :

Une courbe moyenne passant par le centre du fuseau est prévue. Elle est obtenue par la moyenne des passants minimums et maximums tolérés dans chaque tamis.

- Pour les trois granulométries (**plus de sable**) ; (**plus de sable et moins de fines**) ; (**plus de fines, plus de sable et moins de gravier**) :

On attribue le maximum de passant cumulé du fuseau (50 %) sur le tamis de 2mm. Le matériau sera ainsi composé :

- Au maximum de 46% de sable (50 % déduit d'une valeur minimale de fines égale à 4%, c'est le cas **plus de sable et moins de fines**) ;
- Au minimum de 41% de sable (50% déduit d'une valeur maximale de fines égale à 9%, c'est le cas **plus de fines, plus de sable et moins de gravier**) ;
- De 43.5% de sable (50% de sable est déduit d'une valeur moyenne de fines égale à 6.5% $[(9+4) / 2]$, c'est le cas **plus de sable**).

- Pour les deux granulométries (**plus de gravier**) et (**plus de fines et moins de sable**) :

On attribue le minimum de passant cumulé (22 %) du fuseau sur le tamis de 2 mm. Le matériau sera ainsi composé :

- De 77% de gravier (100% déduit d'une valeur moyenne de fines de 6.5 % et d'une valeur moyenne de 16.5 % de sable dans le cas **plus de gravier**) ;
- Au minimum de 13 % de sable (22% déduit de 9% de fines dans le cas **plus de fines et moins de sable**).

- Pour la granulométrie (**plus de fines**) :

On attribue le maximum de passant autorisé (9%) au tamis 0.063, nous reprenons ensuite les mêmes pourcentages moyens pour les autres classes tels que déterminés pour la granulométrie moyenne, auxquels on additionne plus ou moins équitablement les 2.5% qui ont été déduits de la valeur moyenne de fines ($6.5 - 4 = 2.5\%$).

Pour ce qui est de toutes les classes secondaires composant les classes principales gravier (2/25), sable (0.063/2) et fines (0/0.063), les tamisâts minimums ou des valeurs qui s'en rapprochent seront choisies lorsqu'on veut atteindre le maximum de retenu pour ces classes.

On attribue aussi des valeurs situées entre le tamisât minimum et la moyenne lorsque l'on veut attribuer des quantités plus raisonnables à certaines classes plus rares que d'autres dans le matériau disponible, à l'instar de la (1 - 0.5) et de la (4 - 10).

Chapitre V : Granulométries

Les quantités des passants pour les granulométries plus de gravier, plus de sable et plus de fines sont représentées sur le tableau V.2.

Tableau V.2 : Passants choisis pour les granulométries plus de gravier, plus de sable et plus de fines.

Tamis	Tamisât maximum toléré	Tamisât minimum toléré	Granulométrie moyenne (Proctor normal)	Granulométrie plus de gravier	Granulométrie plus de sable	Granulométrie plus de fines
28	100		100	100	100	100
20	99	85	92	85	92	92
10	85	55	70	55	75	70
4	65	35	50	38	60	50.5
2	50	22	36	23	50	37
1	40	15	27.5	17.5	27.5	24
0.5	35	10	22.5	12	19.5	19
0.063	9	4	6.5	6.5	6.5	9

Les quantités des passants pour les granulométries plus de fines et moins de sable ; plus de sable et moins de fines ; plus de fines, plus de sable et moins de gravier, sont représentées sur le tableau V.3.

Tableau V.3 : Passants choisis pour les granulométries plus de fines et moins de sable ; plus de sable et moins de fines ; plus de fines, plus de sable et moins de gravier.

Tamis	Tamisât maximum toléré	Tamisât minimum toléré	Granulométrie plus de fines et moins de sable	Granulométrie plus de sable et moins de fines	Granulométrie plus de fines, plus de sable et moins de gravier
28	100		100	100	100
20	99	85	92	92	99
10	85	55	70	75	79
4	65	35	42	60	64
2	50	22	22	50	50
1	40	15	17	25	30
0.5	35	10	14	17	22
0.063	9	4	9	4	9

Chapitre V : Granulométries

Les tamisâts choisis nous permettent d'obtenir les répartitions en pourcentage de masse des différentes classes comme le montre le tableau V.4.

Tableau V.4 : Pourcentage en masse attribués à chaque classe durant les essais Proctor

Classes granulaires	Moyenne (Proctor normal)	Plus de sable	Plus de fines	Plus de gravier	Plus de fines et moins de sable	Plus de sable et moins de fines	Plus de fines, plus de sable et moins de gravier
Gravier (2/25)	64%	50%	63%	77%	78%	50%	50%
Sable (0.063/2)	29.5%	43.5%	28%	16.5%	13%	46%	41%
Fines (0/0.063)	6.5%	6.5%	9%	6.5%	9%	4%	9%
Somme	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Les valeurs en masse attribuées à chacune des classes secondaires dans les éprouvettes sont données dans l'annexe :

-Pour les éprouvettes de Proctor normal, la masse initiale totale de matériau préparé est de 2.5 kg (compactage Proctor normal).

-Pour les éprouvettes de Proctor modifié, la masse initiale totale de matériau mélangé est de soit 4.5, 5 ou 5.5 kg. En effet, pour le remplissage de l'éprouvette et son arasage pour des granulométries à plus de gravier et de sable, des poids de 5 kg ont suffi, pour les granulométries et plus de fines et de sable, il a fallu préparer 5.5 kg.

V.4 Résultats des granulométries

Les différentes courbes granulométriques sont représentées sur les figures V.2 à V.8 et les caractéristiques Cu et Cc sont définies ci-dessous et leur étalement et courbure selon la norme NF P 94-056 sont représentés dans les tableaux V.5 et V.6.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})}$$

Tableau V.5 : Classes granulométriques en fonction de Cu selon la norme (NF P 94-056)

Valeurs de Cu	Classes granulométriques
$C_u \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 \leq C_u \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 \leq C_u \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 \leq C_u \leq 200$	Granulométrie étalée
$C_u > 200$	Granulométrie très étalée

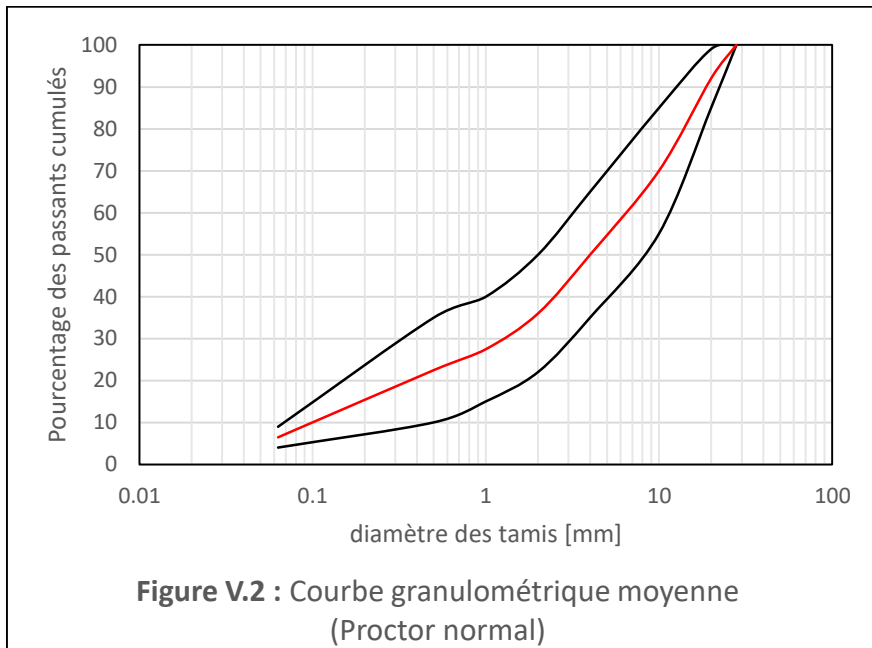
Tableau V.6 : Caractérisation en fonction du Cu et Cc selon la norme (NF P 94-056)

Matériau	Conditions	Désignation	Symbole
Granulométrie sable (0/2)	$C_u \geq 6$ et $1 \leq C_c \leq 3$	Bien gradué	Sable bien gradué (SW)
	$C_u < 6$ ou $1 > C_c > 3$	Mal gradué	Sable mal gradué (SP)
Granulométrie gravier (2/25)	$C_u \geq 4$ et $1 \leq C_c \leq 3$	Bien gradué	Gravier bien gradué (GW)
	$C_u < 4$ ou $1 > C_c > 3$	Mal gradué	Gravier mal gradué (GP)

S : Sable (Sand), G : Gravier (Gravel), W : Bien gradué (Well graded), P : Mal gradué (Poorly graded)

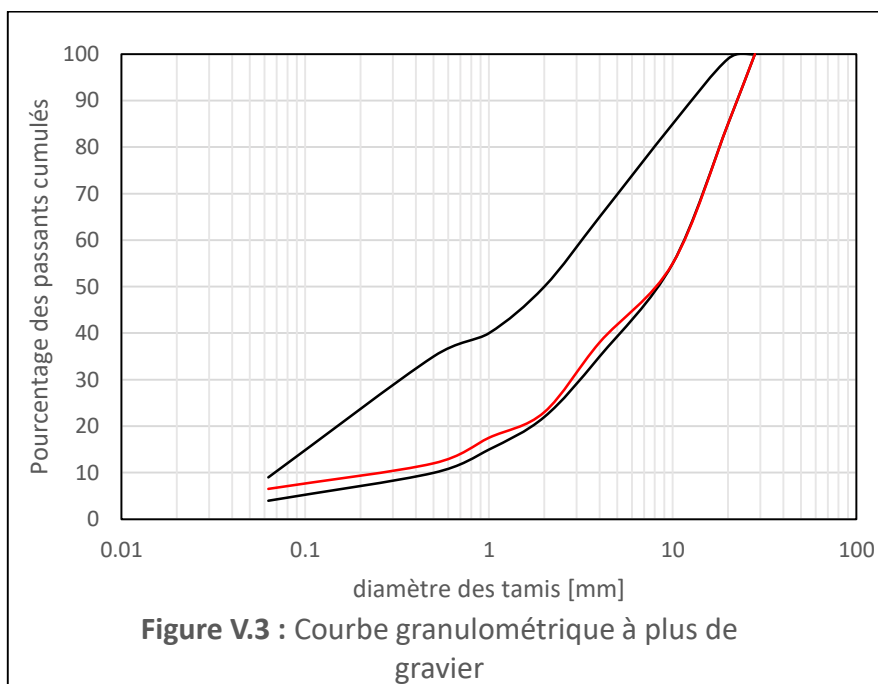
V.4.1 Granulométrie moyenne (Proctor normal)

La courbe de granulométrie moyenne est représentée sur la figure V.2 ; représentant approximativement la courbe moyenne du fuseau normalisé.



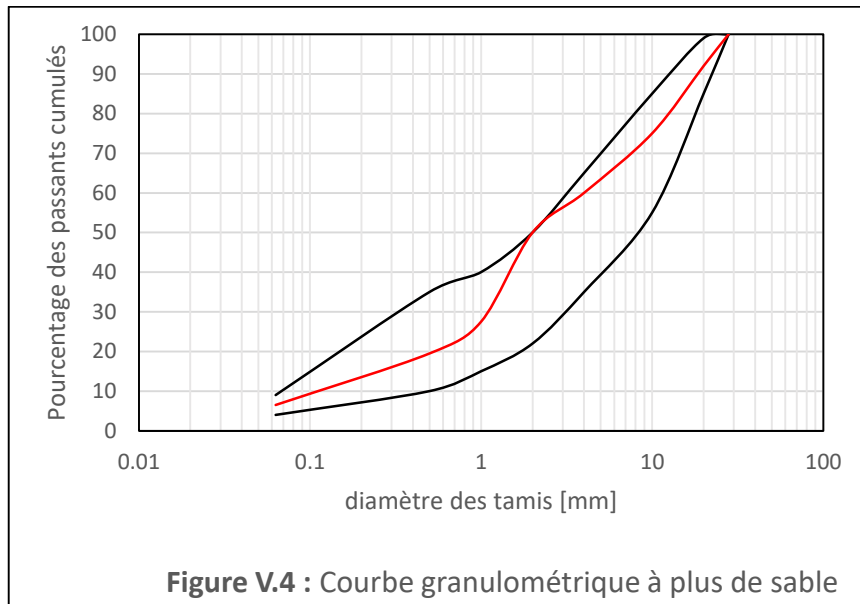
V.4.2 Granulométrie avec plus de gravier

La courbe de granulométrie avec plus de gravier est représentée sur la figure V.3 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité la plus importante en gravier.



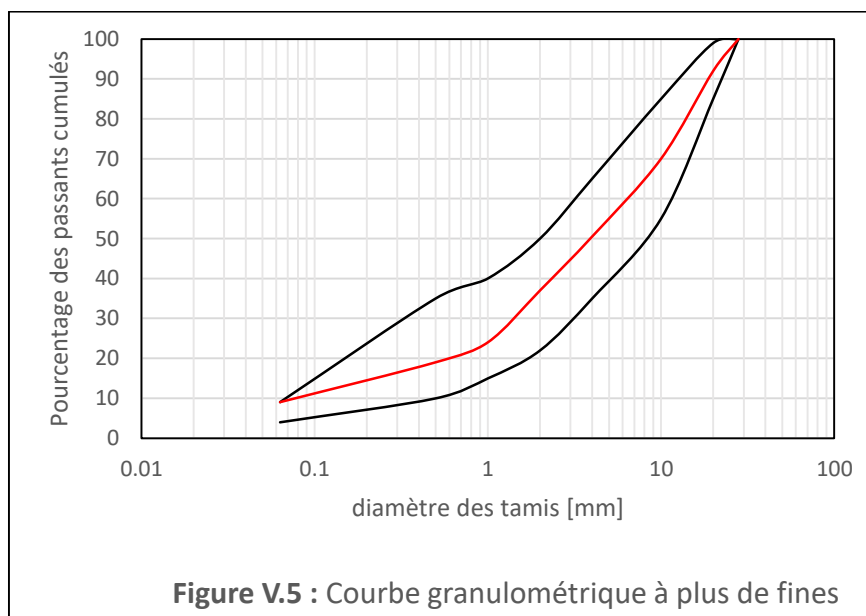
V.4.3 Granulométrie avec plus de sable

La courbe de granulométrie avec plus de sable est représentée sur la figure V.4 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité la plus importante en sable.



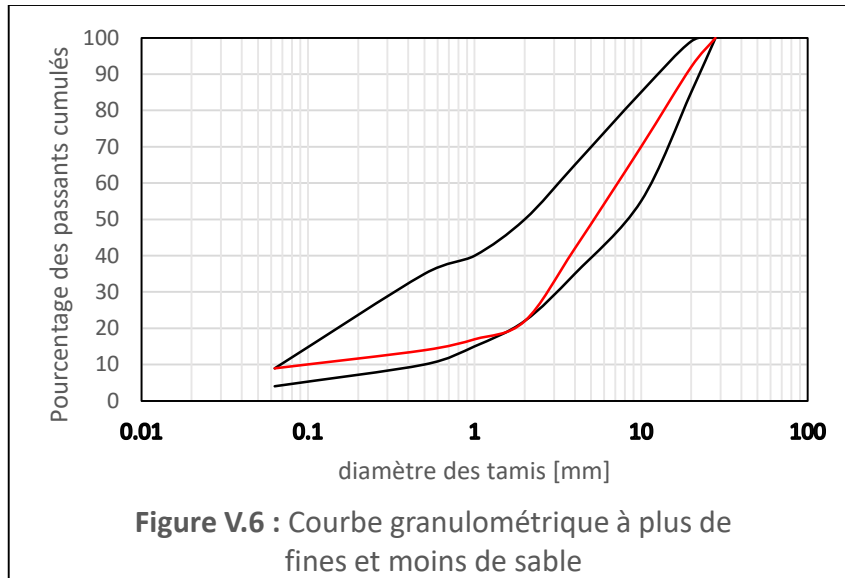
V.4.4 Granulométrie avec plus de fines

La courbe de granulométrie avec plus de fines est représentée sur la figure V.5 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité de fines la plus importante.



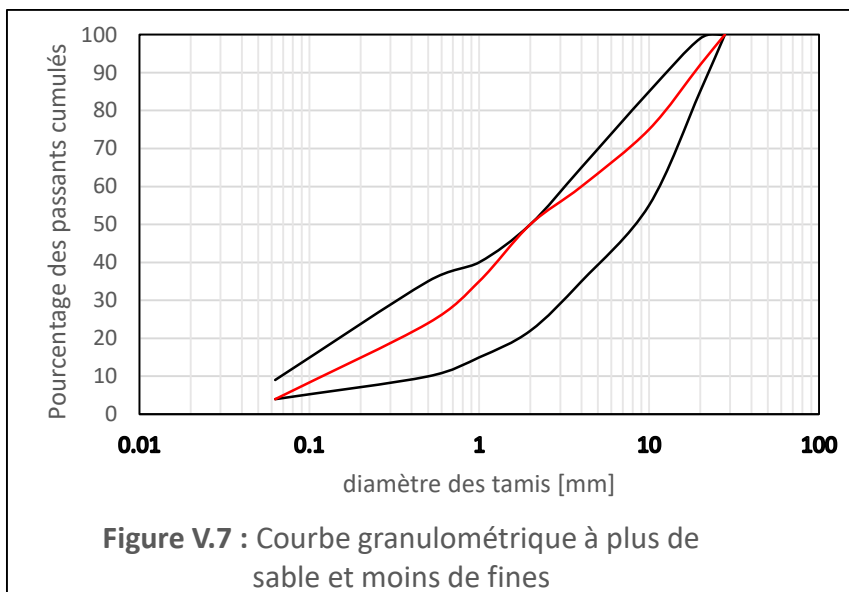
V.4.5 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable

La courbe de granulométrie avec plus de fines et moins de sable est représentée sur la figure V.6 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité de fines la plus importante et la quantité de sable la moins importante.



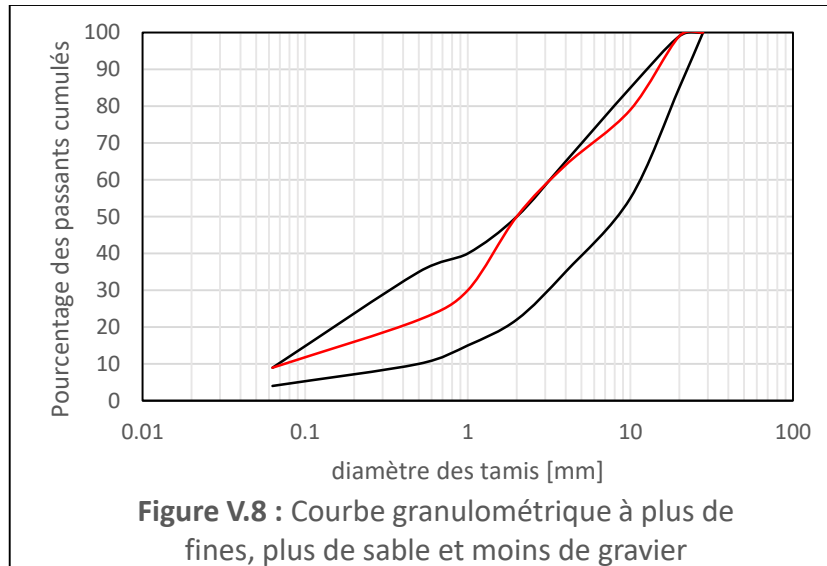
V.4.6 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines

La courbe de granulométrie avec plus de sable et moins de fines est représentée sur la figure V.7 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité de sable la plus importante et la quantité de fines la moins importante.



V.4.7 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier

La courbe de granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier est représentée sur la figure V.8 ; représentant approximativement la courbe ayant la quantité de sable et de fines la plus importante et la quantité de gravier la moins importante.



Des différentes courbes granulométriques, nous pouvons déduire que les granulométries comportent toutes des graviers, des sables et des fines avec des coefficients d'uniformité importants supérieur à 30 ; donc elles toutes étalées. Cependant pour le coefficient de courbure ; les valeurs sont très dispersées et les résultats sont présentés dans le tableau V.7 ci-dessous.

Tableau V.7 : Caractéristiques Cc et Cu des différentes courbes granulométriques.

Nature de la Granulométrie	Cu	Cc	Conclusions
Granulométrie moyenne	65	2,8	Granulométrie bien graduée et étalée
Granulométrie avec plus de gravier	48	2,61	Granulométrie bien graduée et étalée
Granulométrie avec plus de sable	40	3,025	Granulométrie étalée mal graduée.
Granulométrie avec plus de fines	81,25	4,33	Granulométrie étalée mal graduée.
Granulométrie avec plus de fines et moins de sable	73	10,35	Granulométrie étalée mal graduée.
Granulométrie avec plus de sable et moins de fines.	33,33	1,17	Granulométrie étalée et bien graduée.
Granulométrie avec plus de fines et de sable et moins de gravier.	42,67	4,17	Granulométrie étalée mal graduée.

V.5 Essais de compactage Proctor (Normal et Modifié) (NF P 94-093)

Le compactage est une méthode de stabilisation des sols qui agit en surface. Il a pour but d'améliorer la capacité portante du sol par le resserrement des grains et la réduction du volume des vides existants. Le compactage s'effectue sur chantier par les différents engins de compactage et en laboratoire principalement par les essais Proctor modifiés.

V.5.1 Définition et but de l'essai Proctor

L'essai Proctor est un essai de compactage en laboratoire. Il a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale (quantité d'eau adéquate) permettant d'atteindre la densité sèche maximale du matériau compacté. Il permet ainsi de définir les caractéristiques de compactage d'un matériau, à savoir:

- La teneur en eau optimale (w).
- La densité sèche maximale (γ_{dmax}).

Le compactage sur chantier a donc vocation à atteindre les caractéristiques de compactage d'un sol ou d'un matériau donné, déterminées préalablement au laboratoire. Ce qui permet d'améliorer ses caractéristiques mécaniques.

V.5.2 Modalités

Avant l'utilisation d'un matériau sur chantier (construction des chaussées) il faudra d'abord déterminer ses caractéristiques mécaniques au laboratoire afin de voir s'il vérifie les seuils exigés par les normes, lui permettant ainsi de résister correctement face aux efforts exercés sur chantier. Dans le cas du compactage, il doit être soumis à des essais de compactage en laboratoire, pour déterminer la densité sèche maximale qu'il peut atteindre et la quantité d'eau maximale (teneur en eau optimale) nécessaire pour l'atteindre. Une fois que les caractéristiques du matériau sont déterminées au laboratoire et s'avèrent satisfaisantes par rapport aux normes en vigueur, ce dernier est ensuite mis en application sur chantier. L'énergie de compactage ainsi que la teneur en eau optimale de laboratoire sont alors reproduites respectivement par les différents engins de compactage (rouleaux) et d'arrosage (camions citernes) sur chantier, qui font des va-et-vient sur les couches du matériau compacté.

V.5.3 Principe de l'essai

L'essai Proctor, consiste à prendre plusieurs échantillons du matériau à étudier (5 échantillons minimum). On humidifie ces échantillons à des teneurs en eau différentes augmentées de 1 à 2%. On compacte ensuite ces échantillons humides dans un moule normalisé, à l'aide d'une masse normalisée, selon un processus bien défini. Les teneurs en eau et les masses

volumiques sèches des éprouvettes compactées sont déterminées et portées sur un graphique. La courbe obtenue, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique sèche du matériau correspondant à une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage.

Remarque :

Les deux essais Proctor normal et Proctor modifié sont identiques dans leur principe. Seules les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée qui les différencient ainsi que les dimensions des moules et le nombre de couches.

V.5.4 Appareillage

L'appareillage comprend :

- Un socle (une base) de compactage en béton
- Moule Proctor et moule CBR
- La dame dite «dame Proctor normale
- La dame dite dame Proctor modifiée
- Dans le cas échéant, les machines à compacter mécanisées
- Un dispositif d'extraction des éprouvettes hors du moule.



Figure V.9 : Tout l'appareillage utilisé pour les compactages Proctor.

V.5.5 Prise d'échantillon

Pour chaque granulométrie, on effectue 5 à 6 essais Proctor. On prépare en moyenne 5 kg de matériaux pour chaque essai.

Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en cinq échantillons égaux.

Les échantillons sont humidifiés à des teneurs en eau différentes tout en assurant un malaxage correct (briser les mottes sans casser les grains). Après humidification, chaque échantillon est conservé en boîtes ou sacs hermétiques durant un certain temps.

S'agissant d'un matériau sableux et graveleux, un malaxage manuel est effectué. Une durée de conservation pour homogénéisation de 15 min en boîtes ou sacs hermétiques est suffisante.

V.5.6 Exécution de l'essai

Avant de commencer l'essai, il faudra d'abord fixer le type d'essai à réaliser (Proctor normal ou modifié) et le matériel approprié à sa réalisation (type de moule, type de dame de compactage,...)



Figure V.10 : Compactage Proctor modifié **Figure V.11** : Moule Proctor modifié après compactage

V.5.7 Choix du type du moule

Pour un premier essai, le moule Proctor normal est utilisé pour un compactage Proctor normal servant à identifier le matériau et à avoir une idée des teneurs en eau à utiliser pour les essais Proctor modifié.

Le D_{max} étant égal à 25 mm, on utilise le moule CBR pour les essais Proctor modifié.

Après le choix du type du moule (Proctor ou CBR) et du type d'essai (Proctor normal ou modifié), on prend le premier échantillon humidifié et on le divise en 3 ou 5 couches (en fonction du type d'essai), on met la première couche dans le moule et on procède au compactage. La répartition des coups se fait de telle sorte à balayer toute la surface de l'échantillon.

Tableau V.8 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (NF P 94-093).

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Dimensions	Récapitulatif
Proctor normal (Moule Proctor normal)	Masse de la dame	2490 g	3 couches, à raison de: -25 coups par couche (Moule Proctor) -56 coups par couche (Moule CBR)
	Diamètre du mouton	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	
	Nombre de couches	3	
	Nombre de coups par couche	25	
Proctor modifié (Moule Proctor modifié)	Masse de la dame	4535 g	5 couches, à raison de: -25 coups par couche (Moule Proctor) -56 coups par couche (Moule CBR)
	Diamètre du mouton	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	
	Nombre de couches	5	
	Nombre de coups par couche	56	

Après avoir compacté la dernière couche, et retiré la rehausse, le matériau doit dépasser le bord du moule de 1 à 2 cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant avec la règle à araser radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des grains sont arrachés en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, on comble ceux-ci avec des éléments plus fins et on lisse la surface de l'éprouvette.

On démoule l'éprouvette, on détermine le poids humide et on la met à l'étuve pour déterminer le poids sec. Ces opérations sont répétées sur tous les échantillons compactés.

V.5.8 Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de déterminer:

-La masse de l'éprouvette humide M_h (pesée humide);

-La masse de l'éprouvette sèche M_s (pesée sèche);

-La teneur en eau : $W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$

-La masse volumique sèche, en tenant compte du volume réel (V) du moule utilisé:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V}$$

Le volume du moule est généralement donné: 944 cm^3 (moule Proctor : petit moule) et 2124 cm^3 (moule CBR : grand moule). Toutefois, le volume diffère légèrement en fonction du nombre d'utilisations (procéder à la vérification des dimensions du moule après plusieurs utilisations). Les valeurs des masses volumiques et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique $\rho_d = f(w \%)$.

Indications :

Pour avoir une courbe Proctor harmonieuse, l'expérience montre qu'il est bien de varier de 1.5% à 3% max les quantités d'eau (teneur en eau de malaxage) en passant d'un échantillon à un autre. Cependant, pour économiser les pertes en matériau, il est préférable de commencer l'humidification par des teneurs en eau légèrement élevées, et diminuer ensuite ou augmenter la quantité d'eau en fonction de l'état d'humidité constaté après la préparation de chaque échantillon.

Dans le cas du mélange sableux et graveleux qui nous concerne, il est avisé de prendre une teneur en eau de départ d'environ 5% et augmenter ou diminuer de 1,5%.

V.5.9 Quelques interprétations et conclusions

La forme de la courbe Proctor (sa courbure) peut nous renseigner sur la sensibilité du matériau à l'eau.

Les courbes Proctor très bombées représentent généralement les matériaux sensibles à l'eau (sols fins argileux).

Les courbes Proctor très aplaties représentent généralement les matériaux non sensibles à l'eau (sols grenus sableux).

A titre indicatif, les densités sèches (masses volumiques) généralement requises pour un matériau de chaussée sont au voisinage de 2 g/cm^3 en fonction de l'importance du trafic et de la couche visée).

S'il s'agit d'un talus, d'un ouvrage en terre comme une digue ou des couches de forme, on utilise le Proctor normal, par contre pour la constitution des couches de fondations d'une chaussée, c'est le Proctor modifié qui s'avère le plus adéquat.

Pour un sol donné et pour un mode de compactage déterminé, il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale, S'il n'y a pas assez d'eau, la lubrification entre les grains n'est pas assurée. S'il y a trop d'eau, les grains solides glissent les uns sur les autres et ne peuvent plus se placer afin d'occuper une place minimale ; de plus, l'eau prend la place des vides et absorbe une partie de l'énergie de compactage.



Figure V.12 : Quelques bacs de GNT pesés s'apprêtant à être mélangés, humidifiés et compactés

V.6 Résultats des essais de compactage Proctor (Normal et Modifié)

V.6.1 Résultats Proctor normal (granulométrie moyenne)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie moyenne sont regroupés dans le tableau V.9.

Tableau V.9 : Résultats de l'essai Proctor normal (granulométrie moyenne)

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
2	1944	1911	1.7268	2.0245
4	2000	1927	3.7883	2.0413
6	2033	1934	5.1189	2.0487
8	2119	1987	6.6432	2.1049
10	2196	2051	7.0697	2.1727
12	2119	1978	7.1284	2.0953

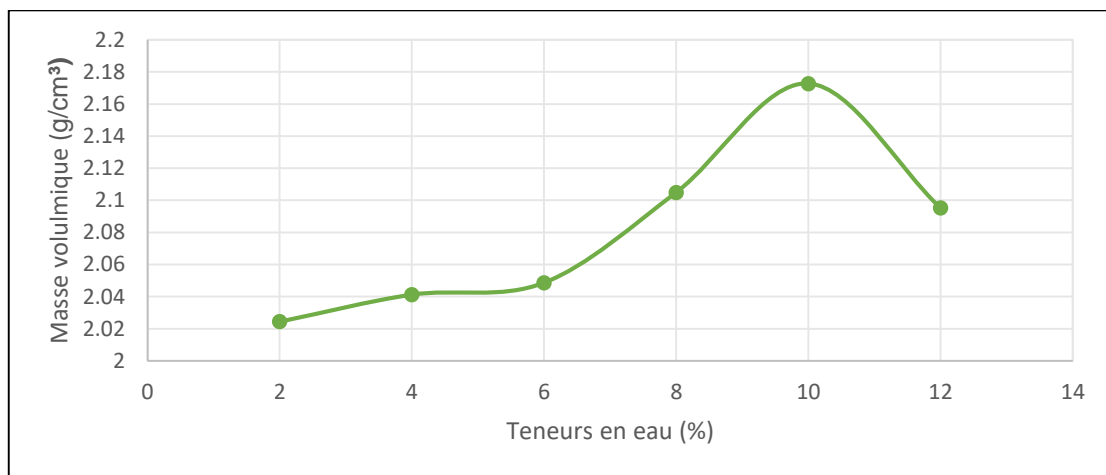


Figure V.13 : Courbe Proctor normal (granulométrie moyenne).

La teneur en eau optimale d'humidification est égale à 10 % d'eau correspondante à une masse volumique de 2.1727 g/cm³.

La masse volumique est supérieure à 2 g/cm³, le mélange est donc idéal pour les chaussées de fondation. La teneur optimale de 10% s'explique par la quantité de fines et de sable plus ou moins importante qui est la source d'absorption d'eau dans ce mélange.

L'allure de la courbe Proctor est assez bombée ; ce qui confirme l'absorption de cette quantité d'eau.

V.6.2 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de gravier sont regroupés dans le tableau V.10.

Tableau V.10 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
2	4594	4515	1.7497	2.1257
4	4714	4548	3.647	2.1412
6	4815	4609	4.4695	2.17
7	5131	4866	5.446	2.291
8	5098	4827	6.6143	2.2726
10	5053	4765	7.0441	2.2434

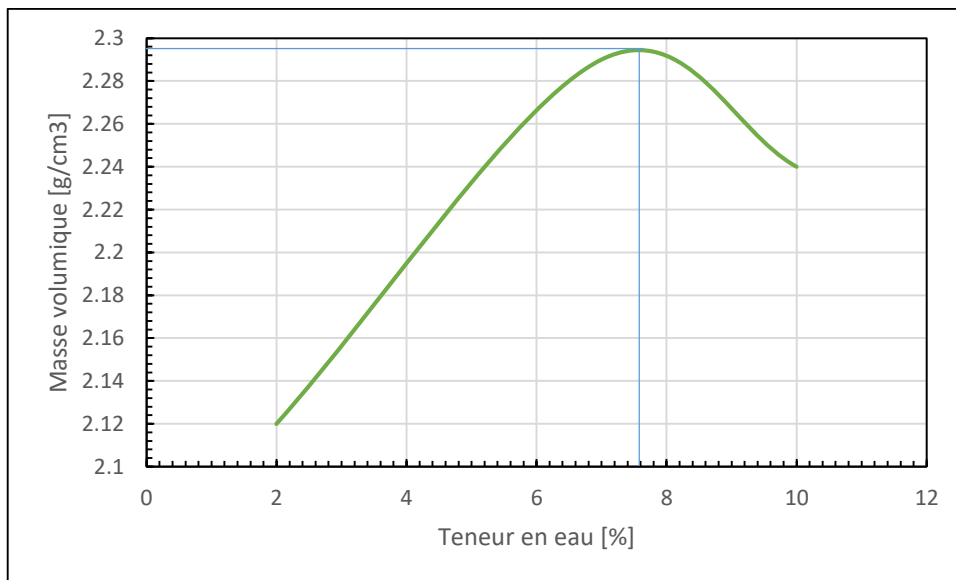


Figure V.14 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de gravier)

Par projection du sommet de la courbe, nous trouvons que l'optimum Proctor d'humidification est de 7.6 %, correspondante à une valeur de la masse volumique de 2.296 g/cm³.

La courbe Proctor est d'allure plutôt bombée mais moins pointue, donc l'influence de l'eau sur le matériau est moins importante. La valeur de la masse volumique optimale est plus élevée que celle trouvée à l'essai Proctor normal et cela est certainement dû à l'énergie de compactage plus importante.

V.6.3 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de sable)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de sable sont regroupés dans le tableau V.11.

Tableau V.11 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de sable).

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
4	4669	4512	3.4796	2.1243
6	4797	4557	5.2666	2.1455
8	5044	4754	6.1001	2.2382
9	5118	4820	6.1826	2.2693
10	5085	4779	6.4030	2.25
14	5071	4731	7.1866	2.2274

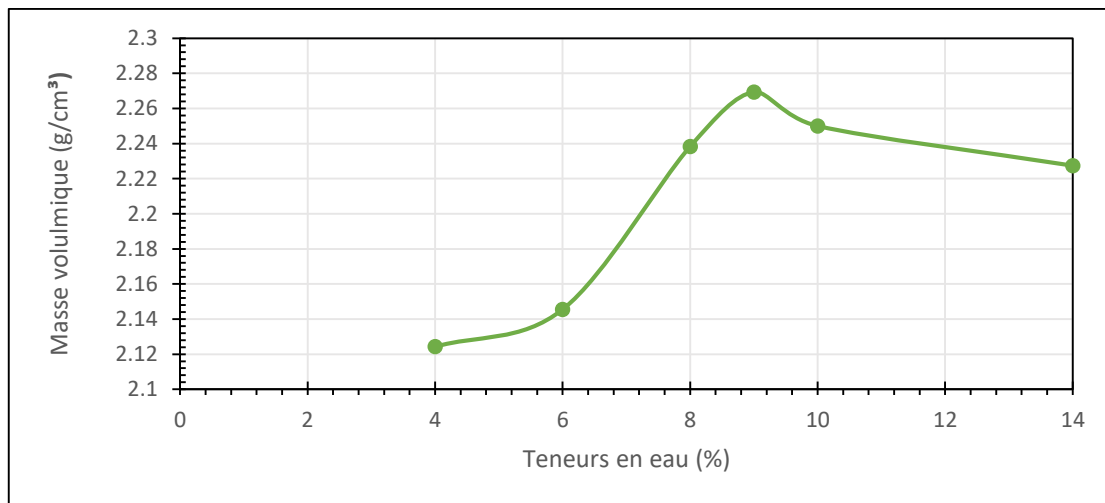


Figure V.15 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de sable)

La teneur en eau optimale d'humidification est égale à 9 % d'eau correspondante à une masse volumique optimale de 2.2693 g/cm³.

La courbe Proctor est d'allure bombée et légèrement pointue, donc il y a une influence de l'eau sur le matériau comparativement à la granulométrie à gravier dominant.

V.6.4 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de fines)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de fines sont regroupés dans le tableau V.12.

Tableau V.12 : Résultats de l'essai Proctor modifié (granulométrie plus de fines).

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
2	4687	4587	2.1801	2.1595
4	4796	4628	3.6301	2.1789
6	5147	4892	5.2126	2.3032
7	5198	4928	5.4789	2.3202
8	5173	4872	6.1782	2.2938
10	5128	4818	6.4342	2.2684

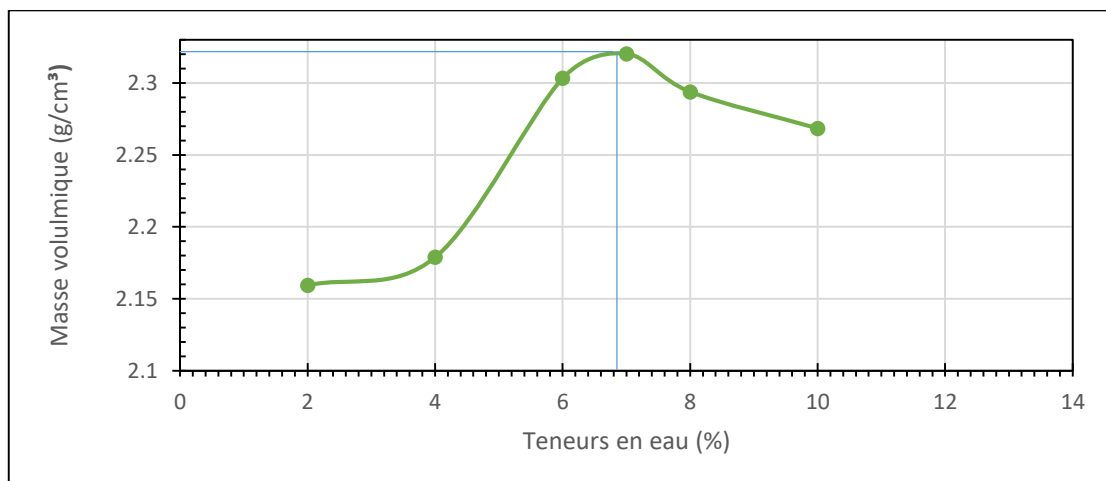


Figure V.16 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines).

Par projection du sommet de la courbe, nous trouvons que la teneur en eau optimale d'humidification est égale à 6.9 %, correspondante à une masse volumique optimale égale à 2.322 g/cm³

Une masse volumique très importante a été obtenue avec la granulométrie à plus de fines car les vides sont remplis de ces fines ce qui rend le mélange plus dense. La courbe Proctor est d'allure assez bombée et est grandement influencée par l'eau absorbée par les fines.

**V.6.5 Résultats Proctor modifié
(granulométrie plus de fines et moins de sable)**

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de fines et moins de sable sont regroupés dans le tableau V.13.

Tableau V.13 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de fines et moins de sable).

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
6	4946	4686	5.5484	2.2062
7	5024	4748	5.813	2.2353
8	5131	4836	6.1001	2.2768
9	5068	4774	6.1584	2.2476
10	5029	4733	6.254	2.2282

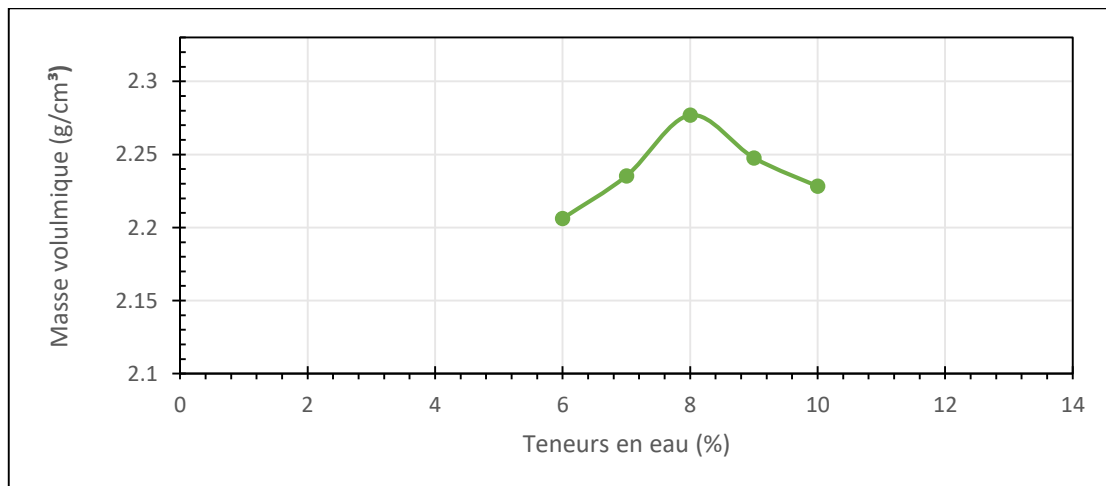


Figure V.17 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines et moins de sable).

La teneur en eau optimale obtenue est égale à 8% d'eau correspondante à une masse volumique optimale de 2.2768g/cm³.

Cette granulométrie a la masse volumique optimale moyenne ; car il y a moins de sable pour occuper les vides malgré la présence des fines et la teneur en eau optimale est juste moyenne comparativement à celles obtenues pour les autres granulométries.

La courbe Proctor est légèrement bombée, ceci est dû à la présence des fines.

**V.6.6 Résultats Proctor modifié
(granulométrie plus de sable et moins de fines)**

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de sable et moins de fines sont regroupés dans le tableau V.14.

Tableau V.14 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de sable et moins de fines).

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
6	4792	4549	5.3418	2.1417
8	4997	4714	6.0034	2.2194
9	5015	4724	6.16	2.2241
10	4976	4680	6.3248	2.2034
12	4952	4653	6.426	2.1907

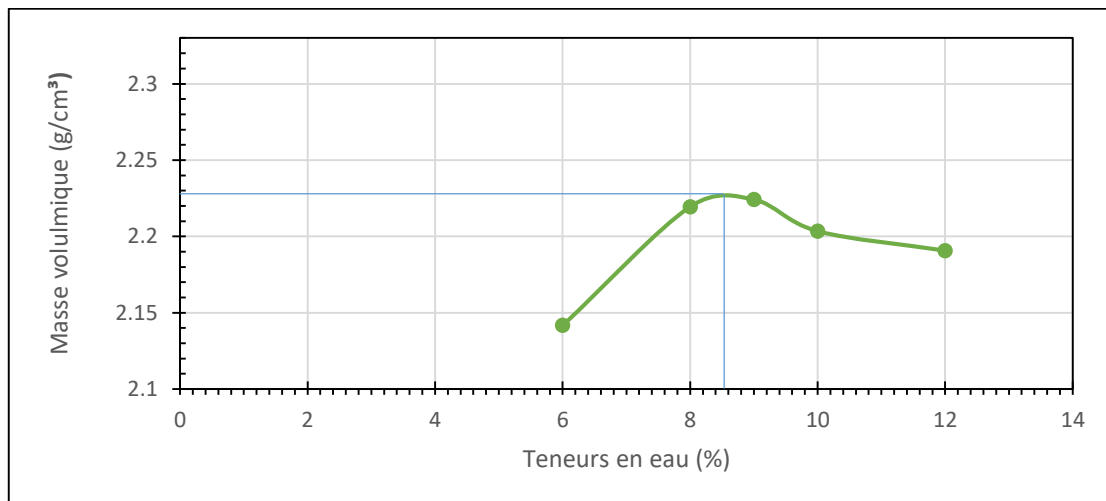


Figure V.18 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de sable et moins de fines).

Par projection du sommet de la courbe, nous trouvons que la teneur en eau optimale d'humidification est égale à 8.55 % correspondante à une masse volumique optimale de 2.228 g/cm³.

Cette granulométrie a la masse volumique optimale la plus basse car il y a moins de fines pour occuper les vides malgré la quantité importante de sable. La teneur en eau optimale est moyenne.

V.6.7 Résultats Proctor modifié (granulométrie plus de fines, plus de sable et moins de gravier)

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation de l'essai Proctor à granulométrie avec plus de fines et de sable et moins de gravier sont regroupés dans le tableau V.15.

Tableau V.15 : Résultats de l'essai Proctor modifié (plus de fines, plus de sable et moins de gravier).

Teneur en eau d'humidification w (%)	Masse humide de l'éprouvette Mh (g)	Masse sèche de l'éprouvette Ms (g)	Teneurs en eau calculées (%)	Masses volumiques sèches(g/cm ³)
7	4733	4504	5.0844	2.1205
8	4911	4650	5.6129	2.1893
9	5102	4796	6.3803	2.258
10	5115	4789	6.8073	2.2547
12	5079	4747	6.9939	2.235

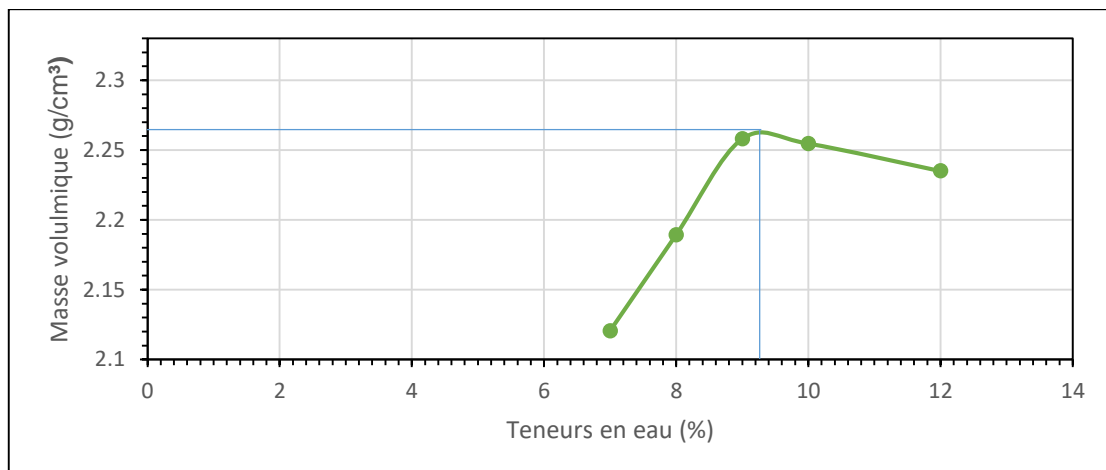


Figure V.19 : Courbe Proctor modifié (granulométrie plus de fines, plus de sable et moins de gravier).

La teneur en eau d'humidification optimale obtenue est égale à 9.25 % correspondante à une masse volumique optimale de 2.2645 g/cm³.

L'allure de la courbe est plus ou moins aplatie. Comme le mélange a plus de fines et de sable pour occuper tous les vides ; le mélange est ainsi dense et la masse volumique obtenue est assez élevée. La teneur en eau optimale est aussi importante par l'absorption de l'eau par les fines.

V.7 Récapitulatifs des résultats des essais Proctor et interprétation

En regroupant les courbes Proctor pour les différentes granulométries (figure V.20), nous remarquons que les variations des deux caractéristiques Proctor (masses volumique optimale et teneur en eau optimale) sont importantes (tableaux 16, 17 et 18).

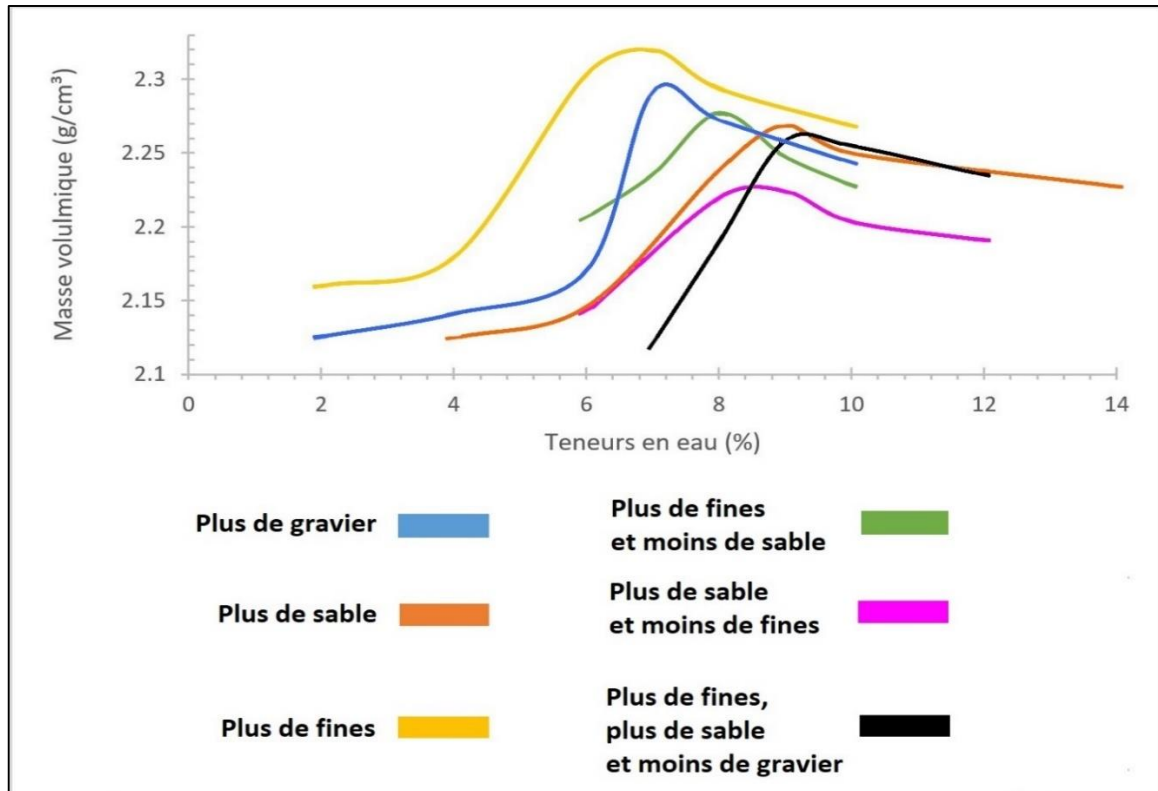


Figure V.20 : Courbes Proctor de toutes les granulométries

Tableau V.16 : Récapitulatif des résultats des essais Proctor.

Granulométrie	Teneur en eau optimale (%)	Masse volumique optimale [g/cm ³]
Plus de gravier (77 %)	7.6	2.296
Plus de sable (43.5 %)	9	2.2693
Plus de fines (9 %)	6.9	2.322
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 %s)	8	2.2768
Plus de sable et moins de fines (46 %s 4 %f)	8.55	2.228
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41% s 50 %g)	9.25	2.2645

Chapitre V : Granulométries

Tableau V.17 : Classement des granulométries selon la teneur en eau optimale par ordre décroissant

Granulométrie	Teneur en eau optimale (%)
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41% <i>s</i> 50 %g)	9.25
Plus de sable (43.5%)	9
Plus de sable et moins de fines (46 % <i>s</i> 4%f)	8.55
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 % <i>s</i>)	8
Plus de gravier (77%)	7.6
Plus de fines (9%)	6.9

Tableau V.18 : Classement des granulométries selon la masse volumique optimale par ordre décroissant

Granulométrie	Masse volumique optimale (g/cm ³)
Plus de fines (9%)	2.322
Plus de gravier (77%)	2.296
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 % <i>s</i>)	2.2768
Plus de sable (43.5%)	2.2693
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41% <i>s</i> 50 %g)	2.2645
Plus de sable et moins de fines (46 % <i>s</i> 4 %f)	2.228

La granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier a la teneur en eau optimale la plus élevée, les (0/2) étant les éléments absorbant le plus d'eau, c'est ainsi que la granulométrie avec plus de gravier est celle présentant à l'optimum la teneur en eau la moins élevée, du fait de la rareté des (0/2).

Les éprouvettes démoulées à plus de fines ont davantage tendance à garder la forme du moule, les mélanges séchés à plus de fines prennent également la forme de gros grumeaux difficiles à effriter. Les fines servent à rendre le matériau cohésif en remplissant tous les vides et à cimenter les granulats en blocs. C'est la raison pour laquelle les éprouvettes à plus de fines sont celles aux masses volumiques les plus élevées.

La granulométrie avec plus de fines a donné une masse volumique maximale. Cette granulométrie est idéale à condition d'être humidifiée à une teneur minimale.

La granulométrie plus de gravier présente la deuxième masse volumique la plus importante en raison du poids de ses éléments, tant qu'un minimum de sable et de fines soit présent tel que défini par le fuseau.

V.8 Conclusion

Selon différentes granulométries, l'optimum Proctor et la masse volumique varient significativement. Ces variations seront intéressantes à analyser au chapitre suivant pour voir quelle incidence elles auront sur la portance des GNT, et si avoir des optimum bas ou élevés, des masses volumiques importantes ou faibles, sont des paramètres à prendre en compte lors de la réalisation d'une assise de chaussée.

Chapitre VI

Essais de portance

Californiens

VI.1 Introduction

L'essai CBR a pour but d'évaluer la portance ou la résistance au poinçonnement d'un sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. En d'autres termes, il sert à évaluer l'aptitude des matériaux à supporter les charges verticales ayant tendance à les poinçonner. Cette caractéristique est indispensable dans les travaux routiers. L'indice CBR permet donc de:

- Etablir une classification des sols GTR (Guide des Terrassements Routier) ;
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement;
- Dimensionner les couches de fondation nécessaires à la construction d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu et des conditions hydriques futures que subira la route (l'épaisseur des couches diminue lorsque l'indice CBR augmente).

VI.2 Présentation de l'essai CBR

VI.2.1 Domaine d'application

L'essai CBR s'applique à tous les matériaux utilisés dans les ouvrages en terre et des assises de chaussées, à savoir, les sols, les matériaux rocheux et à tous les produits et sous-produit industriels définis par la norme NF P11-300, à condition que la proportion des éléments supérieurs à 20mm n'excède pas 30%.

VI.2.2 L'indice CBR immédiat (CBR immédiat)

Cet indice permet d'évaluer la portance d'un sol ou d'un matériau à supporter les surcharges appliquées (par le trafic) sur la chaussée. L'échantillon dans ce cas est généralement humidifié à la teneur en eau optimale déterminée au Proctor normal et ensuite compacté à l'énergie Proctor modifié.

VI.2.3 L'indice CBR après immersion (CBR immersion)

Cet indice permet d'évaluer la portance d'un sol ou d'un matériau à supporter les surcharges appliquées (par le trafic) sur la chaussée dans les plus mauvaises conditions hygrométriques (présence d'eau, climat agressif). Dans ce cas le matériau est compacté à plusieurs teneurs en eau, puis immergé dans l'eau pendant 4 jours. 96 heures (cas général). Toutefois, la durée d'immersion peut être diminuée ou augmentée selon les conditions climatiques réelles auxquelles est soumise la chaussée à réaliser.

Remarque :

L'indice CBR, est un nombre sans dimension, exprimé en (%), définit le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans le matériau type d'autre part.

VI.2.4 Principe de l'essai

L'essai consiste à poinçonner une éprouvette d'un matériau compacté par un piston de section de 19.35 cm enfoncé à une vitesse constante de 1.27 mm/mn. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2.5 et 5 mm sont alors rapportés aux valeurs 13,35 et 20 kN, qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

VI.2.5 Appareillage (CBR immédiat)

L'appareillage est composé :

- Un moule CBR (l'essai CBR ne peut être réalisé que dans le moule CBR) ;
- Un disque d'espacement (disque métallique d'épaisseur normalisée);
- Le matériel de compactage (Proctor normal et modifié), avec l'ensemble de ses accessoires ;
- Une série de surcharges (disques métalliques), appelées également surcharges annulaires, représentant les surcharge dues au trafic;
- Le matériel d'usage courant: balance, bacs, règle à araser....



Figure VI.1 : Tout le matériel de confection des éprouvettes (CBR).

VI.2.6 Appareillage (CBR immersion)

Les équipements nécessaires pour la réalisation de ces essais sont :

- Bacs de hauteur suffisante pour l'immersion complète des éprouvettes;
- Disque ou plateau de gonflement perforé, réglable + papier filtre;
- Dispositif de mesure du gonflement (trépied pour comparateur).



Figure VI.2: Imbibition et gonflement (CBR après immersion).

VI.2.7 Matériel de poinçonnement

La machine CBR utilisée est de marque Geocomp LoadTrac II du laboratoire LGEA de l'université Mouloud Mammeri. Il s'agit d'un appareil automatisé offrant la possibilité d'exécuter les essais de compression/extension et permet d'avoir un contrôle précis du taux de déplacement pendant le chargement. Il peut fonctionner en mode autonome ou peut-être connecté à un PC pour une automatisation complète du début à la fin du test sans intervention de l'utilisateur.



Figure VI.3 : CBR Geocomp Load Trac II servant à poinçonner les éprouvettes (CBR).

VI.2.8 Confection des éprouvettes

Les éprouvettes soumises à l'essai CBR sont compactées à l'énergie Proctor modifié dans un grand moule CBR. Un disque d'espacement est placé d'abord, et enlevé par la suite après compactage pour laisser place aux surcharges annulaires.

Avec l'utilisation du disque d'espacement, le moule après compactage est retourné et la plaque de base est mise sur l'autre face. Le disque d'espacement est extrait, ainsi la face inférieure initialement au cours du compactage est maintenant devenue supérieure face au poinçonnement.

Après avoir placé l'ensemble (moule + matériau) sur la presse en position centrée par rapport au piston, on procède au poinçonnement de deux méthodes différentes selon qu'il s'agisse du CBR immédiat ou du CBR après immersion.

VI.2.9 Détermination de l'indice CBR immédiat (CBR)

On place l'ensemble (moule avec base perforée + échantillon) sur la presse, on interpose dans le volume libéré par le disque d'espacement les surcharges annulaires pour reproduire les efforts que transmettra la chaussée sur le sol dus au trafic) ;

- On approche la face supérieure de l'éprouvette vers le piston jusqu'à ce qu'il affleure le matériau (le piston touche légèrement la surface de l'échantillon) ;
- Le Geocomp effectue un calibrage automatique et une remise à zéro de son dispositif dynamométrique ;
- On exécute le poinçonnement.



Figure VI.4 : Epreuve après poinçonnement.

VI.2.10 Détermination de l'indice CBR après immersion

Une fois que l'échantillon est préparé (compacté), on place un papier-filtre à la surface de l'éprouvette, puis on dispose au-dessus le disque de gonflement et les surcharges annulaires nécessaires ; on fixe le trépied portant le comparateur de mesure du gonflement sur le bord supérieur du moule ;

- On effectue la mise à zéro du comparateur ;
- L'ensemble est placé dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre de 1 à 2 cm l'éprouvette ;
- Après la durée d'immersion nécessaire (généralement, 4 jours: 96 heures), on relève la mesure du gonflement (hauteur Δh) indiquée par le comparateur. On laisse égoutter quelques minutes et on enlève le trépied, les surcharges et le disque de gonflement ;
- L'ensemble est placé sur la presse, les surcharges sont replacées comme précédemment et on procède au poinçonnement.

VI.2.11 But de l'imbibition (immersion dans l'eau)

Le but de cette opération est de placer le sol (le matériau) dans les plus mauvaises conditions hygrométriques qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique. Deux cas peuvent être envisagés.

- Pour un terrain particulièrement sec ne risquant, ni de subir des remontées d'eau (nappe phréatique profonde), ni de recevoir des eaux pluviales (climat très sec ou revêtement étanche), on peut se dispenser de cette imbibition et d'exécuter le poinçonnement directement après compactage de l'éprouvette.

- Pour un terrain pouvant subir de fortes remontées d'eau, ou des inondations, ou recevoir les pluies d'un climat très humide, on procède à une imbibition complète (jusqu'à ce que la variation d'épaisseur de l'échantillon devienne inférieure à 0,03 mm par 24 heures)

VI.2.12 Expression des résultats et interprétations

L'indice CBR est par convention, pour les poinçonneuses manuelles, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$I(2.5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)} \times 100}{13.35}$$

$$I(5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)} \times 100}{19.93}$$

Cependant, étant donné que le Geocomp Loadtrac II est entièrement automatisé, les valeurs de CBR sont données directement. Les valeurs des forces dans la courbe sont en KPa.

La capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé.

Dans le cas de l'indice CBR après immersion, les valeurs de gonflement ou de tassement seront mesurées et données.

Indications :

Les Indices CBR, bien qu'ils dépendent de la structure du sol, ils ne constituent néanmoins pas des caractéristiques intrinsèques. Ils dépendent fortement de la teneur en eau du matériau, de sa masse volumique sèche et de son degré de saturation qui sont des caractéristiques d'état, liées directement aux conditions de mise en œuvre et d'environnement du matériau.

L'indice CBR est accompagné par des indications concernant l'état du matériau, à savoir:

- La masse volumique sèche de l'éprouvette, exprimée en pourcentage de la masse volumique sèche maximale obtenue au Proctor normal ou modifié du matériau
- La teneur en eau de confection de l'éprouvette, exprimée en pourcentage de la teneur en eau optimale obtenue au Proctor normal ou modifié du matériau.
- La valeur de déformation (gonflement) de l'éprouvette ainsi que sa teneur en eau après immersion dans le cas de l'indice CBR après immersion.

Pour une couche de fondation, les matériaux graveleux doivent vérifier :

- $CBR \geq 25\%$ pour chaussées à faible trafic.
- $CBR \geq 30\%$ pour chaussées à moyen et à fort trafic.

(Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, CEBTP, 1984, p141)

Tableau VI.1 : Indices CBR en fonction de la nature des sols (valeurs de référence) (Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, CEBTP, 1984, p137)

Nature des sols	CBR
Sols mous à très mous	< 2
Argiles	2 - 10
Limons et argiles raides	8 - 40
Sables	8 - 30
Graves	15 - 80
Concassés	80 - 100

VI.3 Présentation des résultats de l'essai de portance Californien (CBR)

Indices de portance immédiat et après immersion

Dans cette partie seront consignées les courbes effort-enfoncement de chacune des granulométries issues des essais CBR effectués sur les éprouvettes compactées à l'optimum Proctor modifié.

Puis sont donnés les résultats des I2.5 et I5 correspondants (indices CBR de poinçonnement à 2.5 mm et 5 mm d'enfoncements).

Tous les résultats seront ensuite résumés dans un tableau récapitulatif, suivi des interprétations.

VI.3.1 Granulométrie avec plus de gravier (CBR immédiat)

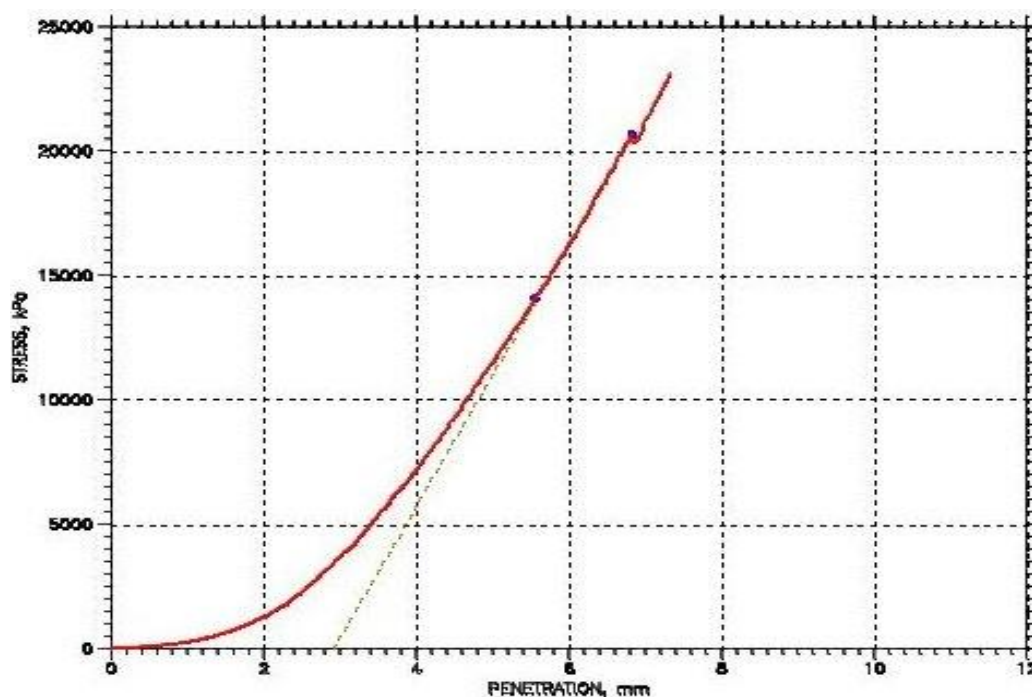


Figure VI.5 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de gravier (CBR IMD)
donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.2 Granulométrie avec plus de sable (CBR immédiat)

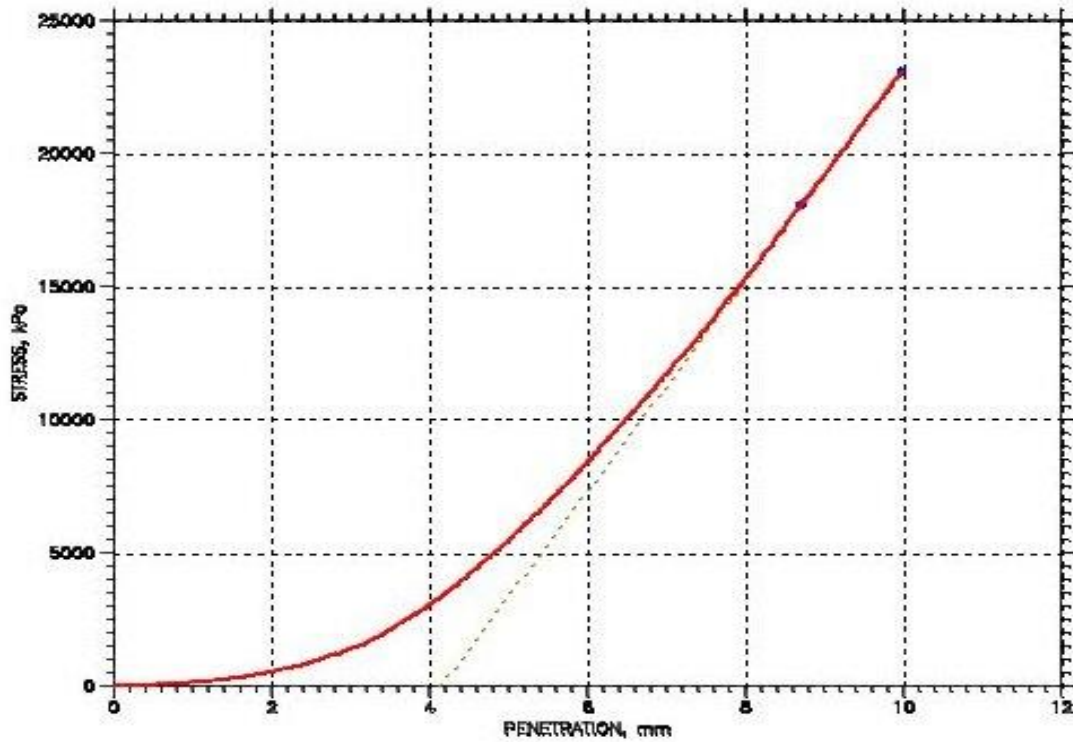


Figure VI.6 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.3 Granulométrie avec plus de fines (CBR immédiat)

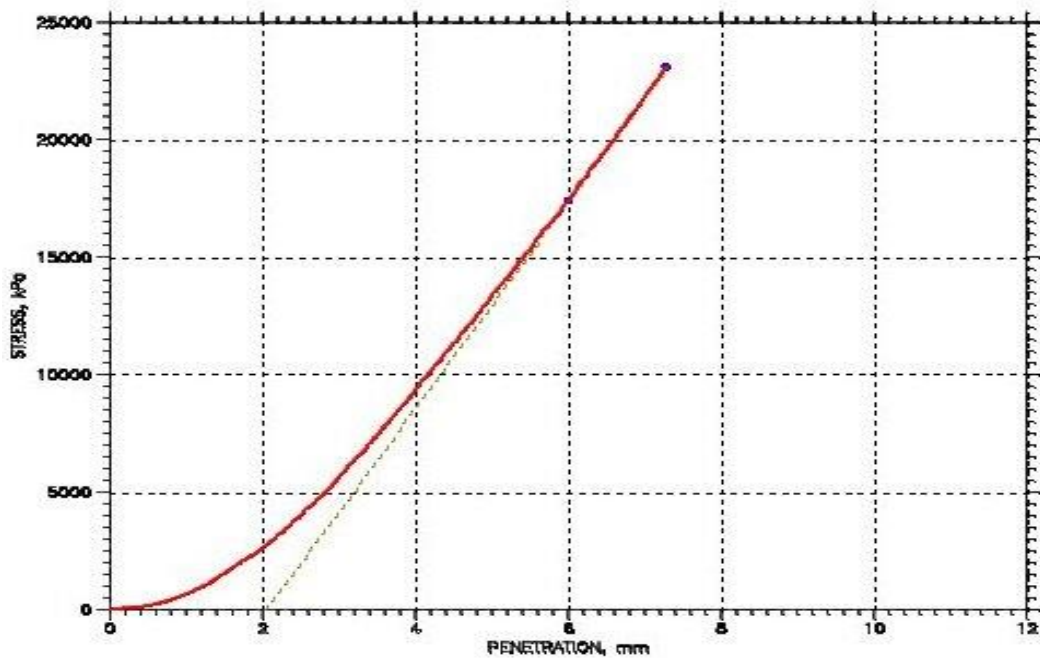


Figure VI.7 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.4 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable (CBR immédiat)

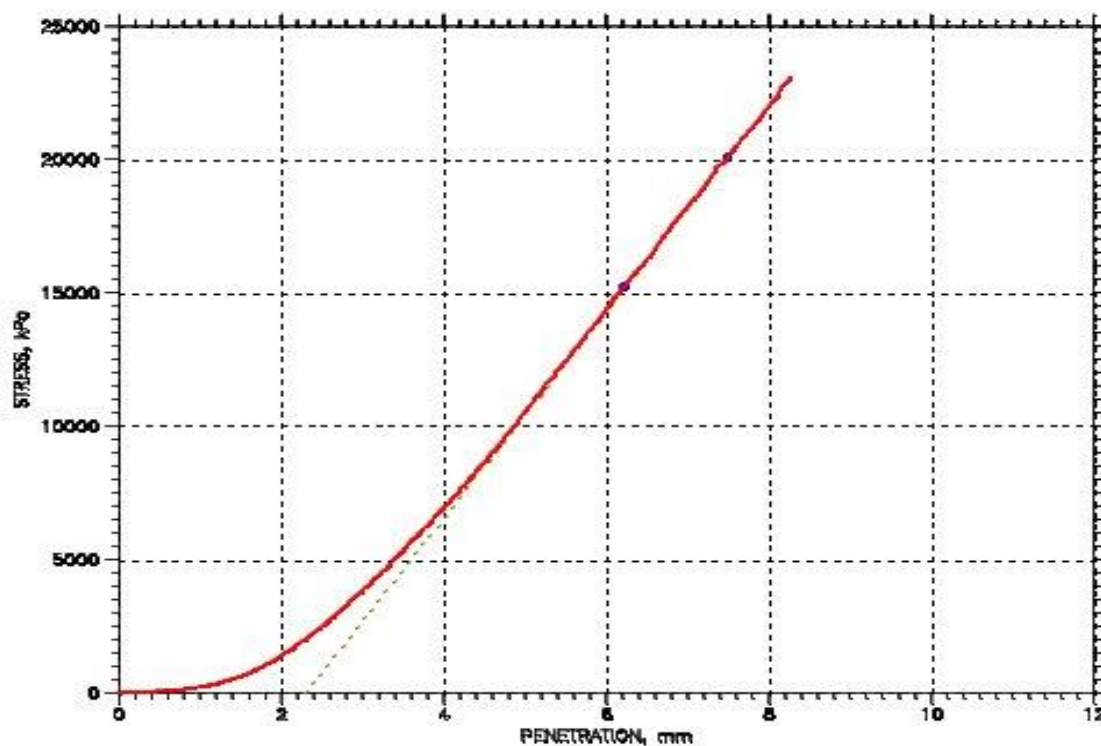


Figure VI.8 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines et - de sable (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.5 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines (CBR immédiat)

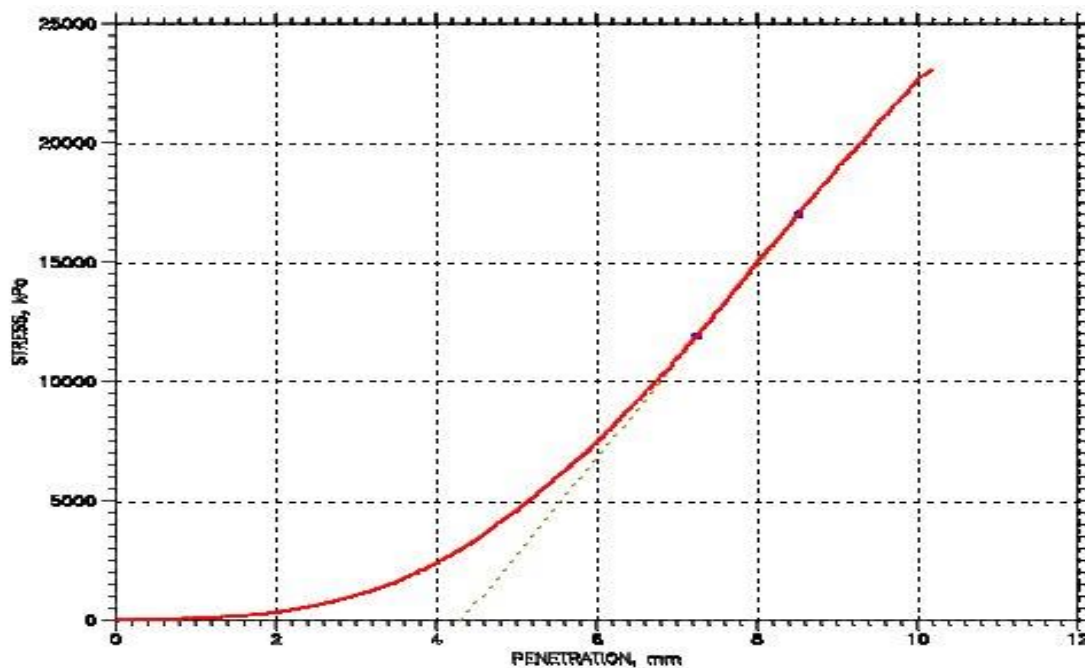


Figure VI.9 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable et - de fines (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.6 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier (CBR immédiat)

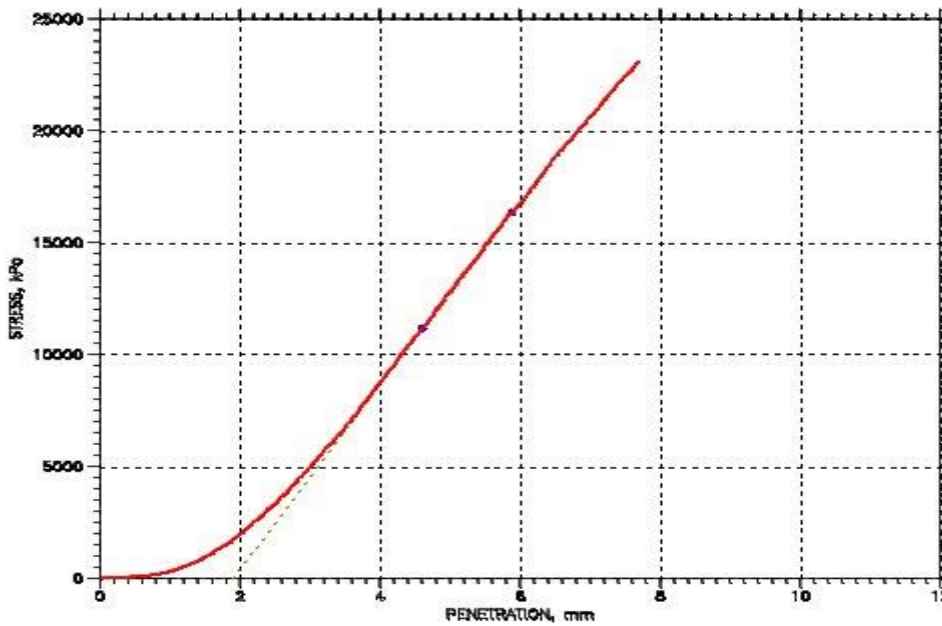


Figure VI.10 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines, + de sable et moins de gravier (CBR IMD) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.7 Granulométrie avec plus de gravier (CBR immersion)

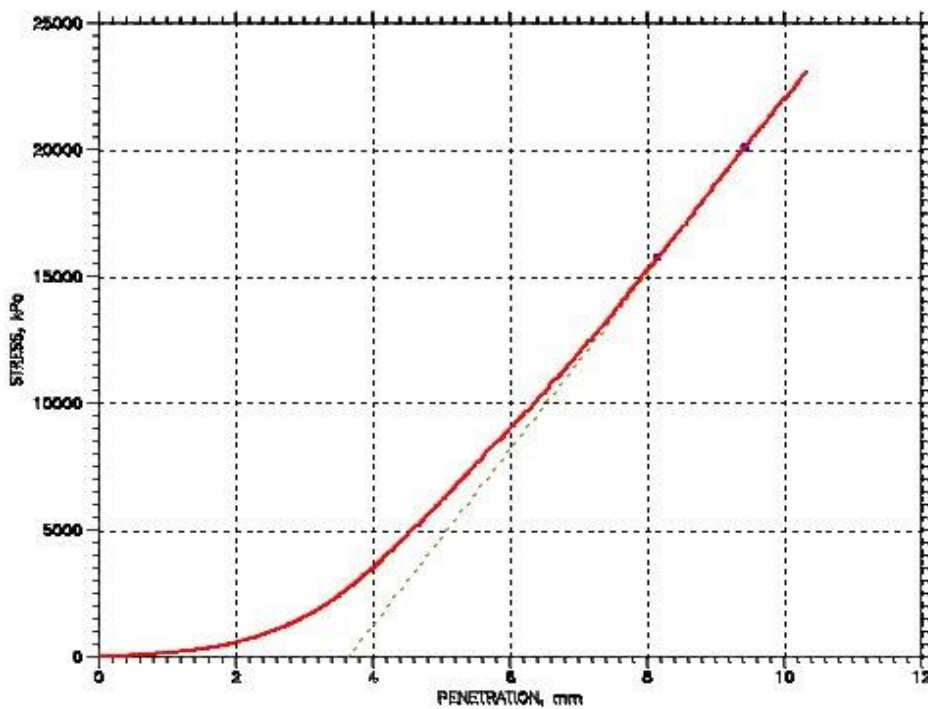


Figure VI.11 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de gravier (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

IV.3.8 Granulométrie avec plus de sable (CBR immersion)

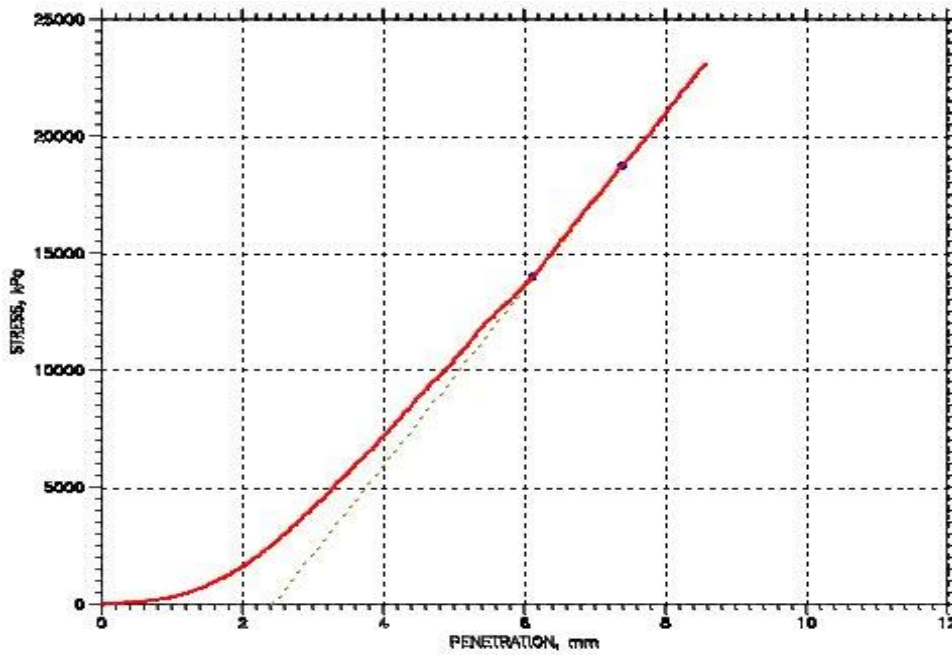


Figure VI.12 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.9 Cas de la granulométrie avec plus de fines (CBR immersion)

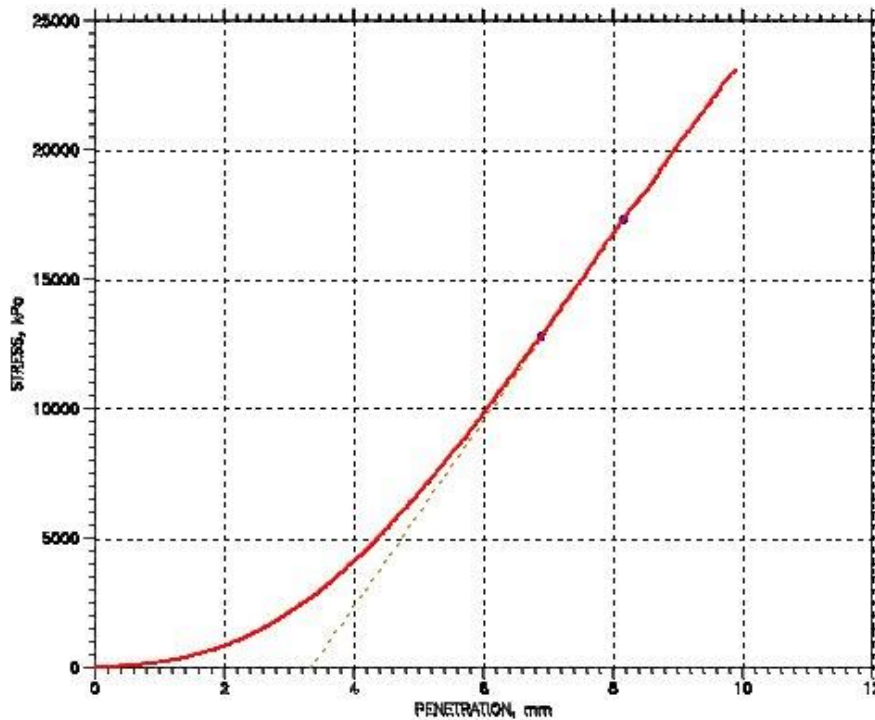


Figure VI.13 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.10 Granulométrie avec plus de fines et moins de sable (CBR immersion)

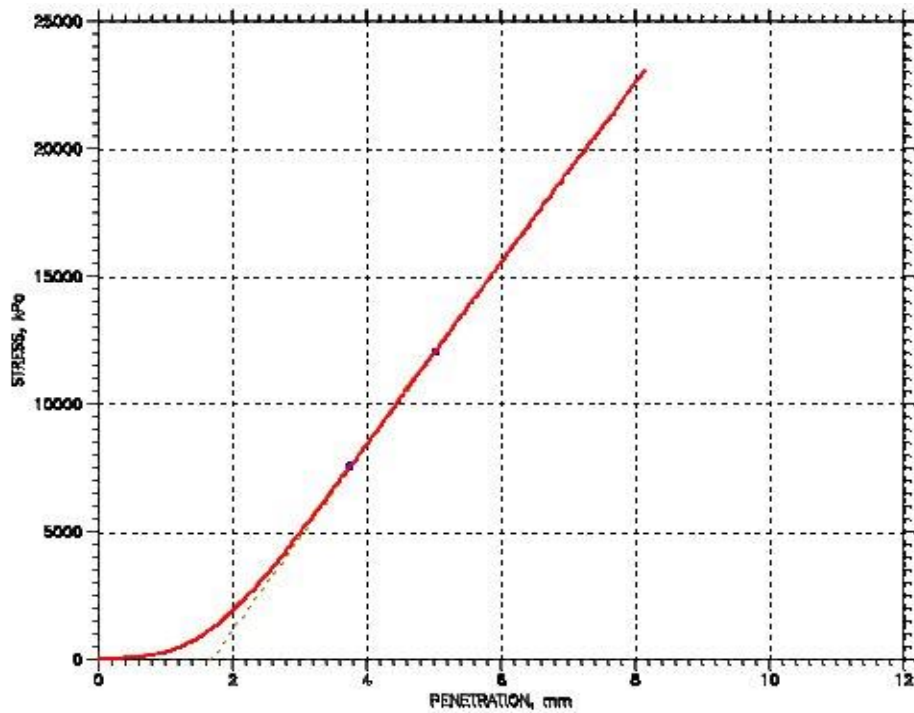


Figure VI.14 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines et - de sable (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.11 Granulométrie avec plus de sable et moins de fines (CBR immersion)

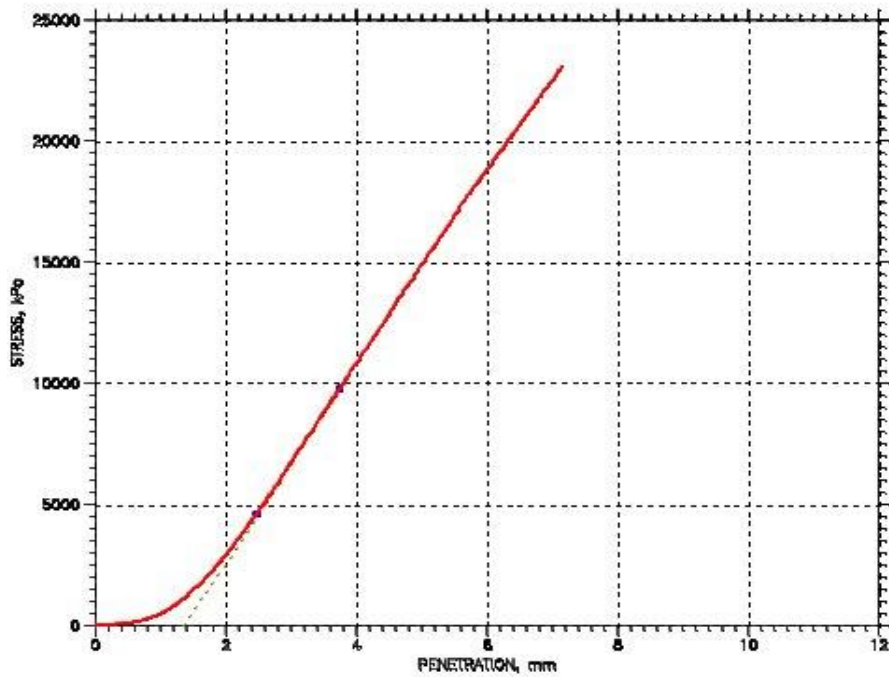


Figure VI.15 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de sable et -de fine (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.3.12 Granulométrie avec plus de fines, plus de sable et moins de gravier (CBR immersion)

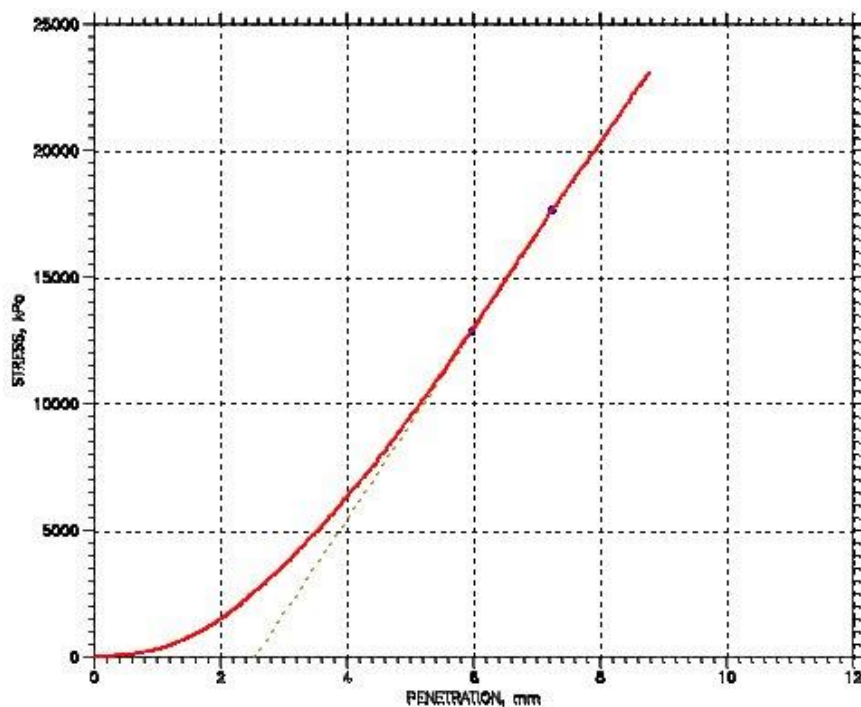


Figure VI.16 : Courbe effort-enfoncement pour la granulométrie + de fines, + de sable et - de gravier (CBR IMM) donnée par le Geocomp Loadtrac II

VI.4 Récapitulatif des résultats et interprétation

Les courbes CBR immédiat et après quatre jours d’immersion sont regroupées respectivement sur les figures VI.17 et VI.18. Notons que les indices CBR immédiat sont compris entre 143 et 230 % et les indices CBR après immersion sont compris entre 133 et 196. Les valeurs des différents indices CBR immédiat ou après immersion sont regroupées dans le tableau VI.2.

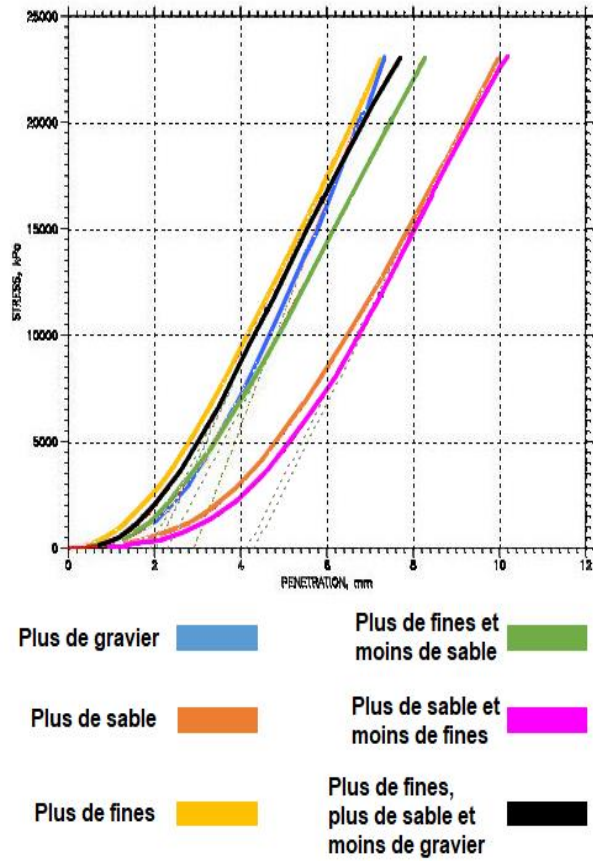


Figure VI.17 : Les courbes effort-poinçonnement du CBR (Geocomp Loadtrac II).

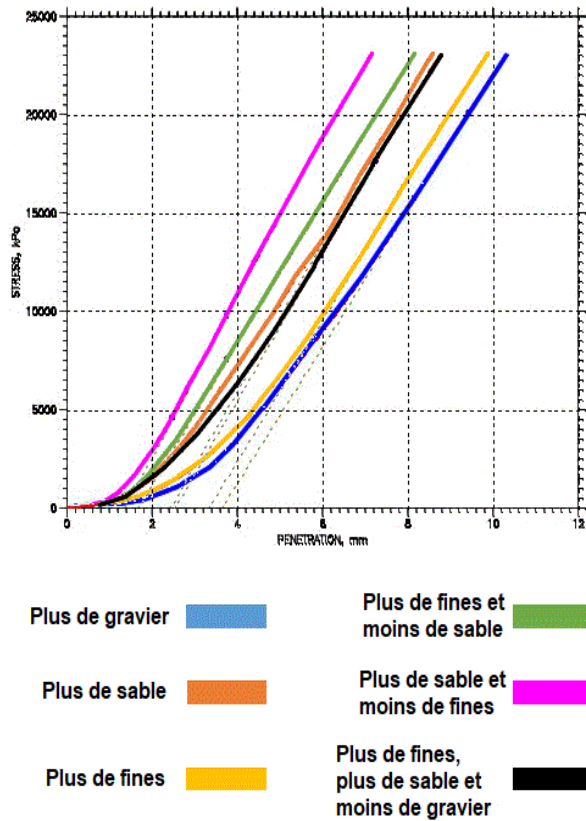


Figure VI.18 : Les courbes effort-poinçonnement du CBR immersion (Geocomp Loadtrac II).

Chapitre VI : Essais de portance Californiens

Tableau VI.2 : Récapitulatif des indices CBR immédiat et après immersion.

Granulométrie	CBR immédiat		CBR après immersion	
	Indice à 2.5 mm (I2.5)	Indice à 5 mm (I5)	Indice à 2.5 mm (I2.5)	Indice à 5 mm (I5)
Plus de gravier (77%)	196	>230	137	170
Plus de sable (43.5%)	154	194	149	184
Plus de fines (9%)	169	216	136	175
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 %s)	143	191	133	175
Plus de sable et moins de fines (46 %s 4 %f)	151	197	151	196
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41% s 50 %g)	152	198	141	183

Cela nous permet d'établir un classement final des portances optimisées selon la granulométrie et selon la présence de la condition d'immersion ou non. On l'établit dans les tableaux ci-dessous :

Tableau VI.3 : Classement des granulométries (absence d'immersion) selon la portance par ordre décroissant

Granulométrie	Indice CBR
Plus de gravier (77%)	>230%
Plus de fines (9%)	216%
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41 %s 50 %g)	198%
Plus de sable et moins de fines (46 %s 4 %f)	197%
Plus de sable (43.5%)	194%
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 %s)	191%

Tableau VI.4 : Classement des granulométries sous immersion selon la portance par ordre décroissant

Granulométrie	Indice CBR immersion
Plus de sable et moins de fines (46 %s 4 %f)	196 %
Plus de sable (43.5%)	184 %
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41 %s 50 %g)	183%
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 %s)	175%
Plus de fines (9%)	175%
Plus de gravier (77%)	170%

Tableau VI.5 : Résultats des tassements obtenus à l'immersion

Granulométrie	Δh (mm)
Plus de gravier (77%)	0.00055
Plus de sable (43.5%)	0.0001
Plus de fines (9%)	0.00215
Plus de fines et moins de sable (9 %f 13 %s)	0.0001
Plus de sable et moins de fines (46 %s 4 %f)	0
Plus de fines, plus de sable et moins de gravier (9 %f 41% s 50 %g)	0.0003

Remarque :

Selon Rodriguez, Castillo et Sowers dans "Soil Mechanics in Highway Engineering" (Rodriguez, 1988), des valeurs de plus de 40 kg/cm² aux essais de compression simple (UCS) ont été reportées dans le cas de matériaux granulaires compactés au Proctor modifié, correspondant à des CBR dépassant largement les 100 %.

Egalement selon le "Soil Stabilization in Pavement Structures" (Terrel, Epps, Barenberg, Mitchell, & Thompson, 1979), une corrélation est établie entre CBR de matériaux granulaires et valeurs de UCS (compression simple). Il est indiqué qu'il n'est pas rare de voir des valeurs très élevées de CBR et UCS pour des concassés bruts compactés au Proctor Modifié.

Dans les conditions normales sans immersion

-La granulométrie ayant la portance la plus optimale est celle à plus de gravier. En effet, les graviers étant les granulats qui assurent de manière principale la fonction de portance. Le mélange avec plus de gravier est le plus solide de tous, à condition d'être combiné avec un minimum de sables et de fines pour que la courbe granulométrique soit comprise dans le fuseau granulaire normalisé.

-La granulométrie ayant la portance la plus petite est celle ayant plus de fines et moins de sable. En effet, les fines ne pouvant pas exercer leur rôle de solidarisation de l'ensemble des éléments de l'éprouvette sans le sable qui aide à transmettre les charges de façon homogène.

Dans les conditions d'immersion

-La granulométrie ayant la portance élevée est celle ayant plus de sable et moins de fines. Elle est également la plus stable de toutes granulométries (baisse de 1% de CBR entre l'immédiat et sous immersion). Sa qualité drainante lui procure une excellente résistance aux inondations, elle ne tasse quasiment pas et est donc celle qui tient le mieux aux conditions d'immersion.

-La granulométrie ayant la portance la moins élevée est celle ayant plus de gravier. Elle est également la plus influencée par l'immersion (chute de plus de 60% du CBR entre immédiat et sous immersion). La forte présence de graviers gros et moyens avec rareté de matériau fin pour combler les vides, procure plus de chances de subir l'écoulement des eaux et de se mettre en mouvement sous chargement.

La granulométrie ayant plus de fines est celle dont la portance reste parmi les moins élevées pour leur forte absorption en eau. En effet, les fines sont les particules qui tolèrent le moins une forte présence d'eau et qui engendre une baisse de la portance.

VI.5 Conclusion

Nous avons pu constater à quel point la granulométrie a un effet clair et mesurable sur la portance. La varier selon les besoins et les conditions de la route à réaliser a donc une utilité avérée pour des performances améliorées et à effort moindre.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les classes granulaires dans un matériau donné jouent un rôle clé dans son comportement mécanique sous contrainte dans une assise de chaussée, et donc influent beaucoup sur sa portance.

Des principaux résultats obtenus dans la partie expérimentale nous pouvons retenir :

- Dans le cadre de la mise en œuvre d'une couche de fondation, tant que la répartition granulaire des matériaux reste au sein du fuseau granulométrique défini par la norme NF EN 13285, nous obtenons toujours des portances très élevées en compactant des GNT. Les variations de la portance ne restent que minimales, la valeur la moins élevée trouvée étant égale à 170 %.

- La granulométrie ayant plus de gravier procure la portance la plus élevée possible, mais elle est également celle dont la portance est la moins optimisée par rapport aux autres configurations dans les conditions d'immersion, avec une chute de plus de 60% du CBR. Ceci doit être dû au fait que l'agencement des graviers est plus facilement perturbé par l'eau devant la rareté du sable et des fines qui servent à garder la cohésion du matériau et à assurer son drainage.

- Après la granulométrie ayant plus de gravier, les diverses granulométries renforcées par les fines sont les plus optimales dans les conditions normales.

- La granulométrie ayant la portance la moins optimale est celle ayant plus de fines et moins de sable. Les fines ayant besoin de l'élément intermédiaire qu'est le sable pour combler les vides entre les graviers et jouer leur rôle de ciment naturel afin de contribuer pleinement à la compacité du matériau.

- Sous immersion, la granulométrie ayant la portance optimale est celle ayant plus de sable et moins de fines. Le sable assure un rôle de drainage et de remplissage des vides, les fines quant à elles stockent davantage d'eau par rapport aux autres granulats, ce qui en fait un maillon faible sous immersion. Les granulométries à plus de fines sont donc les moins portantes en forte présence d'eau.

Recommandations

Il est préconisé de mettre en œuvre des couches de fondation ayant un peu plus de gravier et de fines, avec une bonne proportion de sable, dans un environnement sec et aride.

Dans un environnement à forte pluviométrie et aux conditions difficiles, il est recommandé de réaliser des couches de fondation à plus de sable et un peu moins de gravier et de fines.

Bibliographie

- Boudlal, O. (2016). *Principaux essais de mécanique des sols et de géotechnique routière*. Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri.
- Chapuis RP. (2016). Extracting information from grain size distribution curves. Canada : Geotics Éditions Montreal. Distribution par BiTech Publishers. Available from www.bitech.ca
- CEBTP, C. E. (1984). *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*. Ministère des relations extérieures, coopération et développement.
- CTTP, O. N. (2001). *Catalogue de dimensionnement des chaussées neuve, fascicule 3*. Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes.
- Dawson, A. (1995). The unbound granular base. Keynote paper, Center for Aggregates Research, 3rd Annual Symposium, Austin, Texas.
- Dawson, A. (2001). Granular Pavement Layer Materials...Where are we? ARRB Workshop, Melbourne, Australia, 20 p.
- Dawson, A., Thom, N. and Paute, J.-L. (1996). Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition. Flexible pavements, G. Correia, Rotterdam: 35-44.
- Douglas, R. A. (2016). *Low-volume road engineering: design, construction and maintenance*. CRC Press.
- Jean-Luc Blin-Lacroix, J-P. R. (2011). *Le dictionnaire professionnel du BTP*. (Eyrolles, Éd.) Paris, France.
- Jeuffroy, G., & Raymond Sauterey (1991). *Cours de routes, contrôles de qualité*.
- Jeuffroy, G., & Sauterey, R. (1985). *Cours de routes*. Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Lekarp F., Isacsson U. and Dawson A. (2000). State on the Art. II : Permanent strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1): 76-84.
- Ministère des transports du Québec. (2010). *Cahier des charges et devis généraux : infrastructures routières : construction et réparation*. Québec.
- Prax, A. (1979). *Mémento substances utiles (matériaux de carrière) granulats*. Orléans: Bureau de recherches géologiques, service géologique national.
- Regis C. (1972) *Cours de route*. Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées.
- Schon, C. (1965). *Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S*, Laboratoire Central
- Tannant, D., & Regensburg, B. (2001). *Guidelines for mine haul road design*. Edmonton: School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta.
-

Liste des normes utilisées

AASHTO M 147 (2017) : American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specification for Materials for Soil-Aggregate Subbase, Base and Surface Courses.

ASTM D 1241 – 00 (2015) : Standard Specification for Materials for Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses.

NF EN 13285 (2010) : Graves Non Traitées – Spécifications

NF P 18-573 (1990) : Granulats - Essai de Los Angeles.

NF P 18-572 (1990) : Granulats - Essai d'usure micro-DEVAL.

NF P 18-576 (2013) : Granulats - Détermination du coefficient de friabilité du sable.

NF P 94-050 (1995) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

NF P 94-054 (1991) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94-056 (1996) : Sols, reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P 94-066 (1992) : Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-067 (1992) : Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-078 (1997) : Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion.
Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94-093 (2016) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.

NQ-2560-114 (BNQ 2002) : Travaux de génie civil – Granulats

ANNEXE
