

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Minier



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

THÈME

**VALORISATION DES STERILES DES
TOUT-VENANTS DE CARRIERES**

Etudié par :

Mr. KRAOUCHE Ismail

Dirigé par :

Dr. OULD HAMOU Malek

Proposé par :

L'ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS (ENG)

Septembre 2007

REMERCEMENTS

Arrivé au terme de ce travail, je tiens à remercier, énormément, tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

Aussi, je tiens tout d'abord à remercier **Dr OULD HAMOU Malek** pour son encadrement bénéfique et ses conseils judicieux, qui m'ont été d'une grande utilité, qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mrs les membres du jury, qui ont très aimablement accepté d'examiner mon travail.

Mme DEBICHE, technicienne de laboratoire génie civil pour son aide précieuse et sa disponibilité, et ce, malgré ses nombreuses occupations, je lui dis : merci.

Mme MOHABBEDINE, enseignante de l'ENP pour sa bienveillance et ses encouragements.

Tous les ingénieurs, techniciens et opérateurs du laboratoire CTPP, pour leur disponibilité et leur serviabilité.

Tous **LES ENSEIGNANTS DU DEPARTEMENT GENIE MINIER DE L'ENP** d'abord, pour leur gentillesse, leur générosité, ainsi que leur disponibilité, en dépit de leurs nombreuses occupations.

Enfin, je tiens à remercier toute personne ayant contribué de loin ou de près à ce travail, particulièrement **le personnel** du laboratoire CTPP.

Dédicace

*Avec toute ma reconnaissance, je dédie ce
travail :*

A mes très chers parents,

*A mes chers frères et mes chères sœurs,
A toute ma famille.*

A tout (es) mes vrais (es) Amis (es)

Et à tous ceux que j'aime.

ISMAIL.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو تثمين مجادب المواد الخام للمحاجر من اجل الاستعمال في مجال الاشغال العمومية
الدراسة مرتكزة على التجارب الجيوتقنية, تجارب تعريفية – تجارب خاصة بالطرق.
نتائج التجارب على المجادب على حالتها الاولى تبين ان هذه المادة تستعمل كطبقة اساسية فى شبكة الطرق.
استعمال الجير يعطى تغيير فى مستوى الاستعمال حيث ننتقل من الشبكة الرئيسية الثانية الى الشبكة الرئيسية الاولى وكذلك
من الطبقة الاساسية الى الطبقة القاعدية .
الكلمات الرئيسية: تثمين, مجادب, جير, طبقة اساسية, طبقة قاعدية.

Résumé :

L'objectif de ce travail consiste la valorisation des stériles des tout- venants de carrières, pour leur utilisation dans le domaine des travaux publics (routes).

L'étude est basée sur les essais géotechniques (essais d'identification et essais routiers).

Les résultats des essais sur les stériles bruts ont montré que le matériau ne peut être utilisé qu'en tant que couche de fondation dans le réseau routier.

L'utilisation ensuite de la chaux nous a permis de modifier le niveau d'utilisation, en passant de RP2 à RP1, et, de la couche de fondation à la couche de base.

Les mots clefs : valorisation, stériles, chaux, couche de fondation, couche de base.

Abstract:

The aim of this work is the processing of the tailings of the open pit mines as to use them in the filed publics works.

The study is based on the geotechnical tests.

The results of tests on the raw tailings have shown that the material can only be used as bottom layer. The use of lime allows us to modify some parameters such as the CBR and swelling, hence to modify the level of use passing from RP2 to RP1 and from the bottom layer to the base layer.

Key words: processing, tailings, lime, bottom layer, base layer.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I :	
HYPOTHESES ET DONNEES TECHNIQUES D'UTILISATION	02
I-1. Identification géotechnique des produits	03
I-2. Le traitement en centrale	03
I-3. Matériels de traitement	05
I-4. Utilisations	05
I-5. Sensibilité au gel.	05
I-6. Coûts évités.	06
Chapitre II :	
PARTIE THEORIQUE	07
II Echantillonnage.	08
II-1. Essais et caractéristiques d'identification et de classification des sols.	10
II-1.1. Teneur en eau naturelle.	11
II-1.2. Analyse granulométrique.	11
II-1.2.1 Tamisage.	12
II-1.3 Les limites de consistance ou limites d'Atterberg.	15
II-1.3.1 Limite de liquidité.	17
II-1.3.2 Limite de plasticité.	19
II-1.3.3 Indice de plasticité.	19

II-1.3.4	Indice de consistance et de liquidité.	20
II-1.3.5	Densité relative.	20
II-1.4.	Essai au bleu de méthylène – méthode dite « à la tache ».	21
II-1.5.	Equivalent de sable.	24
II-1.6.	Mesure du coefficient d’aplatissement des granulats.	26
II-1.7.	Essai MICRO-DEVAL.	28
II-1.8.	Essai LOS ANGELES.	30
II.2	Essais routiers.	32
II.2.1.	Contexte.	32
II-2.2.	Détermination de la teneur en eau d’un sol.	32
II.2.3.	Compactage.	33
II-2.3.1.	Définition et facteur d’influence.	33
II-2.4.	Essai Proctor.	35
II-2.5.	Essai C.B.R : détermination de la portance du sol compacté.	40

Chapitre III : DETERMINATION DU TYPE DE RESEAU ET SPECIFICATION DES GRANULATS 46

III-1.	Détermination du type de réseau.	47
III-1.1.	Hierarchisation du réseau routier national.	47
III-1.2.	Choix du niveau de réseau principal.	47
III-1.3.	Choix des structures types par niveau de réseau principal.	47
III-2.	Détermination de la classe de trafic	48
III-2.1.	Définition du poids lourd.	48
III-2.2.	Détermination de la classe de trafic (TPLi).	48
III-3.	Détermination de la portance de sol-support de chaussée.	48
III-3.1	Présentation des classes de portance des sols.	49
III-4.	Description des structures types.	49
III-4.1.	Tableaux récapitulatifs concernant les fiches structures.	49
III-5.	Données d’entrée du dimensionnement.	49
III-5.1.	Durée de vie.	49
III-5.2.	Données climatiques.	50
III-5.3.	Trafic.	50
III-6.	Grave non traitée (GNT).	52

Chapitre IV :	PARTIE EXPERIMENTALE	53
IV-1.	Analyse granulométrique.	54
IV-1.1.	Par tamisage .	54
IV-2.	Les limites d' ATTERBERG.	56
IV-3.	Equivalent de sable.	58
IV-3.1.	Equivalent de sable normal (à 14% de fines).	58
IV-3.2.	Equivalent de sable à 10% de fines.	60
IV-4.	Essai Bleu de méthylène.	63
IV-5.	Essai MICRO-DEVAL.	64
IV-6.	Essai Los Angeles.	65
IV-7.	Essai d'aplatissement.	66
IV-8.	Essai Proctor.	67
IV-9.	Essais CBR.	68
IV-10.	Traitement par la chaux.	74
	CONCLUSION GENERALE	83
	BIBLIOGRAPHIE	85
	REFERENCE	86
	ANNEXE	88

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tab N°01. Classification des argiles selon la valeur de son indice de plasticité.	19
Tab N°02. Classificassion des argiles selon la valeur de son indice de consistance.	20
Tab N°03. Classification des sables et graviers selon la valeur de leurs indices de densité.	21
Tab N°04. Procédure de réalisation de l'essai au bleu de méthylène.	22
Tab N°05. Classification des sols selon son <i>VBS</i> .	24
Tab N°06. Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées.	27
Tab N°07. les indications des charges abrasives par leurs classes granulaires.	29
Tab N°08. caractéristiques des moules pour essai Proctor.	36
Tab N°09. caractéristiques des dames pour essai Proctor.	36
Tab N°10. Essai proctor. compactage du matériau dans le moule.	38
Tab N°11. structures disponibles dans le catalogue.	48
Tab N°12. classes de trafic $TPLi$ adoptées.	48
Tab N°13. classes de portance des sols Si .	49
Tab N°14. réseau principal de niveau 1 (RP1).	49
Tab N°15. réseau principal de niveau 2 (RP2).	49
Tab N°16. durées de vie adoptées.	50
Tab N°17. zones climatiques de pluviométrie.	50
Tab N°18. valeurs du facteur de cumul C .	51
Tab N°19. valeurs du coefficient d'agressivité A .	51

LISTE DES FIGURES

	Page
Fig N°01. Laboratoire de mécanique des sols.	10
Fig N°02. Appareil de pesage (balance).	11
Fig N°03. Appareil de séchage (étuve).	11
Fig N°04. Echelle granulométrique ou classe des éléments minéraux du sol.	12
Fig N°05. Analyse granulométrique par tamisage.	14
Fig N°06. schéma du comportement mécanique typique des états du sol.	16
Fig N°07. Appareil de Casagrande.	17
Fig N°08. Détermination de W_l .	18
Fig N°09. Détermination de W_p .	18
Fig N°10. Abaque de Casagrande.	18
Fig N°11. Essai d'équivalent de sable.	26
Fig N°12. Appareillage Proctor et CBR.	36
Fig N°13. courbe granulométrique de la GNT.	56
Fig N°14. détermination graphique de la limite de liquidité.	58
Fig N°15. courbe du Proctor sans la chaux.	68
Fig N°16. graphe du CBR sans la chaux à 55 coups.	71
Fig N°17. graphe du CBR sans la chaux à 25 coups.	72
Fig N°18. graphe du CBR sans la chaux à 10 coups.	73
Fig N°19. graphe du CBR à 2% en chaux avec 55 coups.	75
Fig N°20. graphe du CBR à 4% en chaux avec 55 coups.	76
Fig N°21. graphe du CBR à 6% en chaux avec 55 coups.	77
Fig N°22. courbe du Proctor avec 4% en chaux.	78
Fig N°23. graphe du CBR à 4% en chaux avec 55 coups.	79
Fig N°24. graphe du CBR à 4% en chaux avec 25 coups.	80
Fig N°25. graphe du CBR à 4% en chaux avec 10 coups.	81
Fig N° 26. courbe granulométrique de la GNT corrigée.	83
Fig N° 27 . schéma de traitement.	84

ABREVIATIONS UTILISEES

W_l	Limite de liquidité.
W_p	Limite de plasticité.
W_r	Limite de retrait.
I_p	Indice de plasticité.
I_c	Indice de consistance.
I_l	Indice de liquidité.
I_d	Indice de densité.
e	Indice des vides.
VBS	Valeur au bleu du sol.
W	Teneur en eau naturelle.
ESV	Equivalent de sable visuel.
ES	Equivalent de sable au piston.
E	Ecartement des grilles à fentes.
MDE	Micro- Deval.
LA	Los Angeles.
CBR	Californian Bearing Ratio.
GTR	Guide technique routière.
R_t	Résistance au traction.
RP	Réseau principal.
RP1	Réseau principal de niveau 1.
RP2	Réseau principal de niveau 2.
RN	Route nationale.
CW	Chemin de wilaya.
GB	Grave bitume.
GL	Grave laitier.
BCg	Béton de ciment goujonné.
GC	Grave ciment.
GNT	Grave non traitée.
SG	Sable gypseux.
TUF	Tuf calcaire.
AG	Arène granitique.
SB	Sable bitume.
PL	Poids lourd (véhicule de plus de 3.5 tonnes de PTAC).
PTAC	Poids total autorisé en charge.
TPLi	Classe de trafic en nombre de poids lourd par jour et par sens.
PL / j / sens	Poids lourd par jour et par sens.
TCi	Trafic cumulé de PL.
TCEi	Trafic cumulé en essieux équivalents de 13 tonnes.
n	Durée de vie.
i	Taux d'accroissement géométrique du trafic.
A	Coefficient d'agressivité.
C	Facteur de cumul.
O.P.N	Optimum proctor normal.
O.P.M	Optimum proctor modifié.02

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Les scalpings résultent de l'élimination en carrière, avant les cycles de concassage et criblage, de la partie basse du tout-venant, issu du front d'abattage de la carrière. Ils sont généralement fins (0/12mm à 0/40 mm environ, en fonction du crible utilisé et de la difficulté liée au criblage de ces produits, selon leur degré « d'argilosité » et leur teneur en eau). Ils contiennent une proportion non négligeable d'éléments argileux qui les rendent à l'état naturel, sensibles à l'eau et leur confèrent une plasticité, pouvant être néfaste lors de leur compactage sur chantier.

Les scalpings, concentrant des particules fines argileuses, ne peuvent être utilisés à l'état naturel. Il semble intéressant, d'une part, de les traiter, afin de les rendre aptes à certaines utilisations dans les ouvrages de travaux publics.

D'autre part, par souci d'économie de matériaux nobles de carrières (calcaires durs, pierres à chaux...) pour les maîtres d'oeuvre et celui de l'optimisation de l'exploitation des carrières pour les producteurs de granulats, la valorisation des produits de scalpage issus de gisements de calcaires durs est à promouvoir car les volumes de scalpage représentent environ 10% du gisement exploitable, et au fil du temps forment de véritables terrils, neutralisant alors des surfaces conséquentes au niveau des exploitations en carrières.

CHAPITRE I :

HYPOTHESES ET DONNEES

TECHNIQUES D'UTILISATION

I.1 IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE DES PRODUITS :

Les coupures granulométriques rencontrées au premier stade sont comprises entre 0/12mm et 0/40 mm (0/D). La teneur moyenne en fines (éléments inférieurs à 80µm) de ces produits est la plupart du temps comprise entre 12 et 35% (voire moins dans certains cas). Les teneurs en éléments argileux (caractérisées et quantifiées par l'essai de valeur au bleu d'un sol, VBS) sont généralement inférieures à 1.5. Ces paramètres moyens qui peuvent parfois connaître des fluctuations liées au gisement des carrières, permettent de classer les matériaux de scalpage en classe B selon le GTR (Classe B : 'Sols sableux et graveleux avec fines', LCPC-SETRA, sept. 92), de B1 à B6 (en moyenne B5), [annexe 1,2].

Les traitements éventuels successifs, que subissent les scalpages, permettent de rendre ces matériaux moins sensibles à l'eau par la floculation des argiles (action de la chaux notamment) et de conférer aux matériaux des performances mécaniques qu'ils ne possèdent pas à l'état naturel (liants hydrauliques, tels que liants spéciaux routiers, par exemple). Les différents liants utilisés pour ces traitements sont décrits dans la paragraphe ci-dessous.

I.2 LE TRAITEMENT EN CENTRALE :

Le traitement des scalpages de carrières en centrale permet :

- de procéder à d'éventuels ajouts d'eau en période sèche, pour conférer au matériau une teneur en eau compatible avec une bonne densification (amener le matériau traité à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal),
- de disposer d'un matériau prêt à l'emploi, souple d'utilisation en opération d'élargissement de voirie ou de réalisation de chantiers à dimensions réduites,
- un stockage temporaire des nouveaux matériaux élaborés (valable pour certains liants hydrauliques seulement)

Il peut être mené à l'aide de différents liants, à savoir :

- La chaux vive :

L'action de la chaux vive est multiple.

En effet, la chaux possède plusieurs actions, à commencer par la floculation des argiles qui rend le matériau moins sensible à l'eau (action de la chaux sur les charges électriques des particules fines et modification des champs magnétiques inter-particulaires). Cette floculation

des argiles se traduit géotechniquement par une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification de sa limite de liquidité, d'une augmentation de la résistance au cisaillement du sol et d'une modification des caractéristiques de compactage du sol (réduction de la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche, pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmentation de la valeur de teneur en eau permettant de l'obtenir)

L'adjonction de chaux permet, d'autre part, à une réduction de la teneur en eau des scalpages (qui peuvent être relativement humides en fonction de la saison, de leur nature et de leur durée de stockage). Cette baisse résulte de l'hydratation de la chaux, réaction exothermique consommant de l'eau, et, vaporisant de plus une partie de cette eau contenue dans les matériaux. L'ajout de matière sèche au mélange permet également de réduire la teneur en eau (augmentation de la masse sèche par rapport à la masse d'eau).

La chaux confère, en outre, au produit traité une certaine prise hydraulique. Le matériau fabriqué est ainsi apte au trafic et offre des résistances mécaniques relativement bonnes.

- Les cendres volantes issues des centrales thermiques au charbon :

Ces produits, issus des résidus de la combustion du charbon des centrales thermoélectriques, sont le plus couramment des cendres volantes silico-alumineuses. Elles peuvent être ajoutées aux scalpages en leur confèrent une prise hydraulique et leur offrent de bonnes résistances mécaniques.

- Les liants spéciaux routiers :

Les liants routiers ont un principe d'action voisin des ciments, car ils contiennent les mêmes constituants que ces derniers (dans des proportions différentes toutefois). Ils permettent d'offrir de très bonnes performances mécaniques aux matériaux traités.

Les scalpages traités à la chaux ou aux cendres volantes peuvent être stockés temporairement et repris par la suite. En effet, la cinétique de réaction de prise hydraulique est beaucoup plus lente que dans le cas de liant hydrauliques routiers (quelques heures généralement), ce qui permet une plus grande souplesse d'utilisation.

I.3 MATERIELS DE TRAITEMENT :

Il s'agit généralement « d'unités de malaxage » fixes.

Ces matériels permettent de réaliser des fabrications de produits traités par incorporation des différents constituants du mélange dans les proportions définies, et d'ajuster la teneur en eau du mélange à celle définie lors des études de laboratoire (adapter la teneur en eau du mélange pour l'amener à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal). Les matériaux bruts (hors pulvérulents tels que chaux et liants routiers, stockés dans des silos étanches) sont introduits dans des trémies qui permettent de les doser et d'ajuster leur pourcentage. Ils sont ensuite envoyés dans un malaxeur les mélangant, et, en même temps, on ajoute l'eau nécessaire à l'ajustement de la teneur en eau du mélange (le cas échéant).

Ces matériaux fabriqués peuvent alors soit être envoyés sur chantier directement, soit stockés dans le cas de traitement chaux et/ou cendres volantes.

I.4 Utilisations :

Les principales utilisations sont les suivantes :

- Couches de forme routières.
- Plateformes de bâtiments.
- Remblais à fortes contraintes.
- Parkings et aires de stockage.
- Béton de propreté.
- Emploi sous dallages de bâtiments.

I.5 SENSIBILITE AU GEL :

Les scalpées traitées sont peu ou non gélifs de par la nature de leurs traitements. La résistance au gel de ces matériaux traités est jugée satisfaisante, si la R_t à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel est supérieure à 0.25 MPa.

La comparaison de l'évolution des caractéristiques de résistance à la compression simple d'un même matériau ayant, ou non, subi la pénétration du gel donne les résultats suivants :

- un matériau traité à la chaux vive reste sensible au gel. Il est considéré comme peu gélif au sens du catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves. Il résiste à -5°C ,
- un matériau, traité à 2% de chaux vive et 10% de cendres volantes, est considéré à moyen terme tout à fait résistant au gel.

I.6 COUTS EVITES :

A titre d'exemple, citons l'expérience de scalpages traités sur divers chantiers de la Région Nord - Pas-de-Calais a permis de réaliser des économies :

- de 35 à 40 % par rapport à un grave-laitier, pour un scalpage traité à 2 % de chaux et 10 % de cendres volantes en assises de chaussées
- d'environ 50% par rapport à un matériau de type D (au sens du GTR) pour un scalpage traité à 1% de chaux en couche de forme. [1]

CONCLUSION :

La valorisation des scalpages, qui vise à utiliser la totalité des gisements, s'inscrit dans le mouvement du Développement Durable, par la réduction des terrassements et des mises en décharges, la préservation des réserves naturelles nobles, un moindre impact visuel en diminuant les hauteurs de merlons en carrières, l'économie des matériaux nobles des carrières, la réduction des émissions polluantes, de la gêne des riverains, de la pollution sonore liée au trafic, de la dégradation des chaussées empruntées pour l'évacuation des matériaux issus des terrassements...

CHAPITRE II :

PARTIE THEORIQUE

II ECHANTILLONNAGE :

- **But et principe de l'échantillonnage :**

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau, dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Ce problème est complexe à résoudre, mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus au cours des essais de laboratoire.

Le prélèvement d'échantillons se pratique en deux temps :

1. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande, que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
2. Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

- **Prélèvement sur le tas (sables et graviers) :**

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas, tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Dans le cas des matériaux de carrière, il faudra également prendre en compte l'hétérogénéité des différents bancs rocheux exploités.

- **Echantillonnage en laboratoire :**

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur (par division).

L'échantillon doit être séché en étuve à 105°C, s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60°C dans le cas contraire.

- Quartage :

L'échantillon est divisé en quatre parties égales, dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi une quantité d'un échantillon représentatif du matériau initial.

- Echantillonneur (diviseur) :

Cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques, la quantité de matériaux représentative et nécessaire à l'essai envisagé.

• Choix du procédé :

Ces deux procédés peuvent être utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la grosseur maximale des grains. Si l'échantillon de départ est d'un volume très important, une ou deux opérations de quartage permettent de diminuer rapidement le volume des matériaux traités ensuite à l'aide de l'échantillonneur. Celui-ci sera choisi de telle manière que son ouverture soit de dimension compatible avec celle des plus gros grains du matériau traité.

Dans tout projet de construction, la reconnaissance géotechnique doit être réalisée avec soin, afin de fournir les éléments nécessaires à la conception . Le laboratoire ou l'organisme, chargé de la reconnaissance, effectue des sondages en des points précis sur le terrain, avec extraction des échantillons du sol. Ces derniers sont soit remaniés et servent ainsi aux essais d'identification, tels que l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg ..., soit intacts et servent aux essais routiers (Proctor et CBR).



Fig N°01 : Laboratoire de mécanique des sols.

La classification des sols en catégories s'appuie sur les essais et les caractéristiques suivantes :

- La forme des grains (forme ronde à bords arrondis, anguleux, en éclats, en plaque ou aiguilles).
- La teneur en eau d'un sol.
- L'analyse granulométrique (coefficient d'uniformité et celui de courbure).
- Les limites d'Atterberg (indice de consistance).
- La valeur au bleu de méthylène d'un sol (VBS).
- Equivalent de sable.
- Teneur en matières organiques.
- Teneur en carbonates.
- Retrait (plus un échantillon de sol est plastique et humide, plus le retrait sera important).
- Consistance au voisinage de la limite de plasticité.
- Résistance à l'état sec.
- Densité humide et sèche.
- Structure de l'échantillon.

II.1 Essais et caractéristiques d'identification et de classification des sols :

Les essais d'identification sont les premiers essais à réaliser sur un sol. Ils vont permettre de déterminer les caractéristiques élémentaires de ce dernier et d'établir ainsi ses propriétés physiques.

II.1.1 Teneur en eau naturelle :

Cette teneur en eau est le premier essai à effectuer, permettant de connaître le pourcentage en eau présent dans l'échantillon.

Elle définit le rapport en pourcentage du poids d'eau p_w que le sol contient au poids p_s de ses éléments secs. L'obtention des éléments secs s'obtient par dessiccation du sol, pendant 24 heures en étuve à 105 °C.



Fig N°02 : Appareil de pesage (balance)



Fig N°03 : Appareil de séchage (étuve).

II.1.2 Analyse granulométrique :

La dimension des particules et leur répartition a un effet considérable sur le comportement de certains sols, en particulier sur les sols grossiers. Il est donc intéressant de classer les sols, en connaissant la grosseur des particules et leur distribution relative. La gamme des grosseurs des gains est très étendue (les sols peuvent être formés de blocs, de cailloux de grande diamètre ou de matériaux ultra-fins).

C'est pourquoi sous forme de graphe, on traduira la relation entre le logarithme du diamètre des grains et la distribution dimensionnelle en poids cumulative de ces derniers en pourcentage. L'établissement de cette distribution par procédé porté le nom d'analyse granulométrique.

Cette analyse comprend deux opérations :

- Le tamisage pour le cas des sols grossiers.
- La sédimentométrie pour les sols à grains fins comme le limons.

II.1.2.1 Tamisage :

➤ But de l'essai :

L'analyse granulométrique par tamisage permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale supérieure ou égale à 80µm.

➤ Principe de l'essai :

Cet esai consiste à faire passer l'échantillon à travers une colonne de tamis, emboîtés les uns aux autres (figure 5), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis, afin de quantifier la taille des particules dans le but de caractériser le sol (fin, grossier, ...).

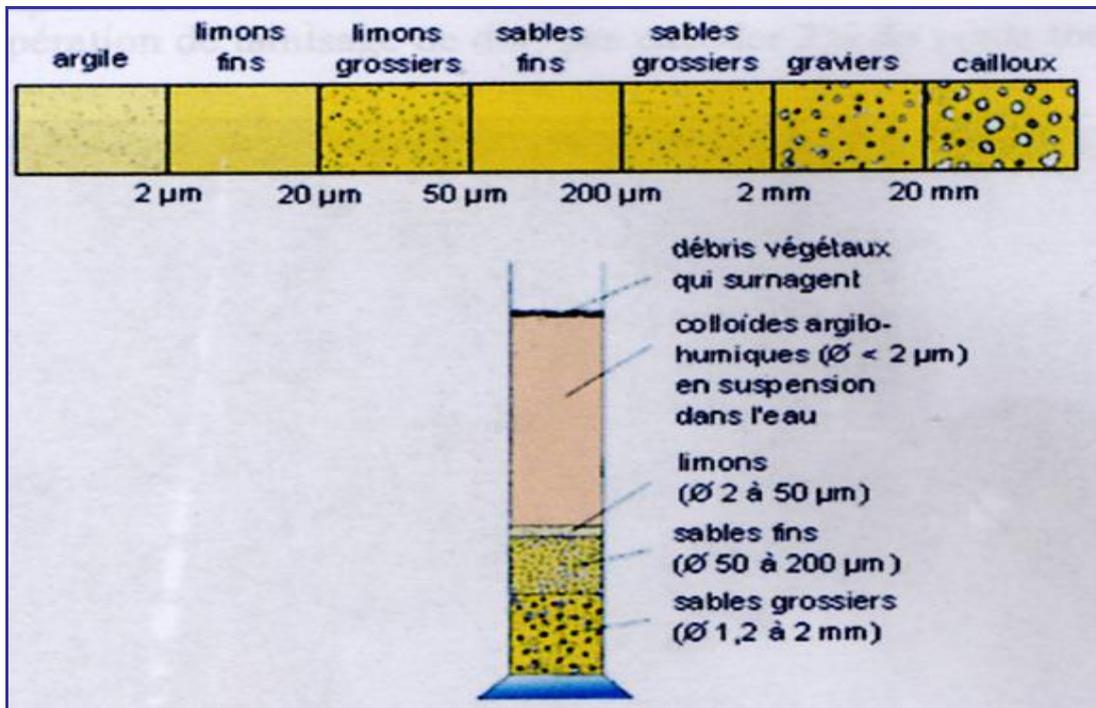


Fig N°04 : Echelle granulométrique ou classe des éléments minéraux du sol.

➤ Conduite de l'essai :

La prise d'essai est séchée à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante puis pesée (masse M_1).

On réalise ensuite un tamisage par lavage, afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0.080 mm du reste de l'échantillon. Cette manipulation est réalisée après une période de trempage de 24 heures, afin de favoriser la séparation de l'ensemble des grains.

Un dispersant peut être éventuellement utilisé pour faciliter cette opération. Au cours du lavage, il y a lieu de protéger le tamis de 0.080 mm par un ou deux tamis d'ouverture plus grande placés au-dessus.

Le lavage se poursuit jusqu'à ce que l'eau passant à travers le tamis de 0.080 mm soit claire.

L'échantillon ainsi préparé est alors séché à (110 ± 5) °C. Après refroidissement, il est pesé jusqu'à masse constante (masse M_2). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

➤ Préparation de l'échantillon :

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soit pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que : $M \geq 0.2D$ avec M : masse de l'échantillon en Kg et D diamètre du plus gros granulat soit exprimé en mm.

➤ Description de l'essai :

Le matériau séché, de masse M_2 , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissants du bas de la colonne vers le haut. Dans la partie inférieure, on dispose un tamis de 0.080 mm, surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne, afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisat** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est déversé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci vibrera.

La somme des refus cumulés mesurée sur les différents tamis et du tamisat sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériau pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder 2% du poids total de l'échantillon de départ.

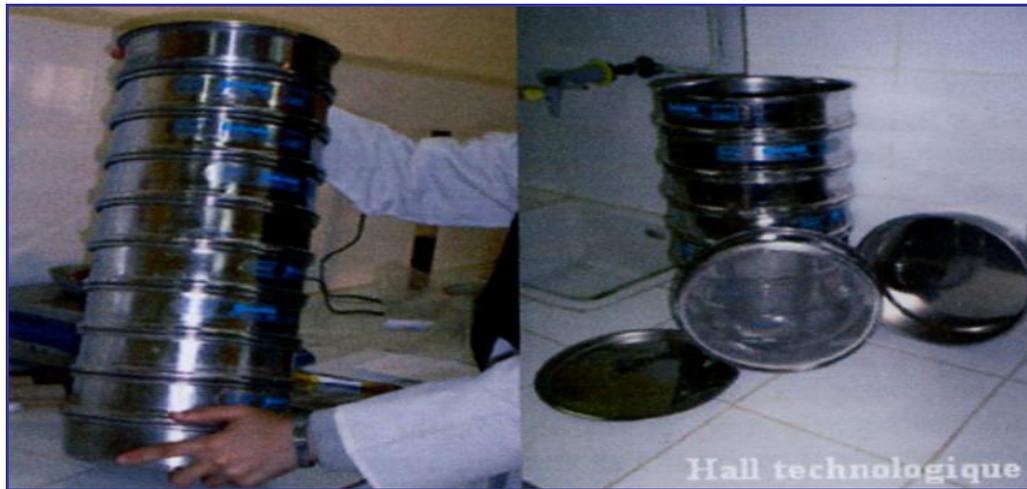


Fig N°05 : Analyse granulométrique par tamisage.

L'essai granulométrique par tamisage consiste à faire passer l'échantillon à travers une colonne de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis afin de quantifier la taille des particules dans le but de caractériser le sol (fin, grossier,...).

Les résultats des refus sont exprimés en pourcentage de la masse sèche M_1 de départ.

Le pourcentage des fines f est calculé comme suit :

$$f = (M_1 - M_2) + P / M_1 \times 100. \quad \text{Avec :}$$

M_1 : Masse de la prise d'essai, en Kg.

M_2 : Masse séchée du refus à 0.080 mm, en Kg.

P : Masse du tamisat restant dans le fond, en Kg.

➤ **Diamètre effectif ou efficace :**

C'est le diamètre qui correspond à 10% du tamisat. On le note D_{10} .

➤ **Coefficient d'uniformité ou de Hazan :**

Il pourrait constituer en gros un paramètre de forme de la courbe. On le définit comme suit : $C_u = D_{10} / D_{60}$.

Ou D_{60} est le diamètre des grains en mm correspondant à 60% du tamisat.

➤ **Coefficient de courbure :**

Il est déterminé par la formule suivante :

$$C_c = D_{30}^2 / D_{60} \times D_{10}.$$

Ou D_{30} est le diamètre des grains en mm correspondant à 30% du tamisat.

II.1.3 Les limites de consistance ou limites d'Atterberg :

➤ But de l'essai :

La présence de l'eau dans les pores d'un sol à grains fins pouvait en modifier le comportement de façon significative. Il importe non seulement de connaître la quantité d'eau présente dans un dépôt naturel mais aussi de situer cette teneur en eau sur une échelle. Les limites de consistance permettent d'atteindre cet objectif et constituent un indice important en géotechnique.

Les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance. Par définition, ce sont les teneurs pondérales en eau qui délimitent certains comportements critiques. Elles visent à déterminer le domaine hydrique dans un sol argileux à comportement plastique.

Elles ont été élaborées au début du XX^{ème} siècle par A. Atterberg, un pédologue suédois, qui s'intéressait à la plasticité des argiles, en vue de la fabrication de produits céramiques. Les essais mis au point à cette époque ont été repris et modifiés par Casagrande, afin que leur interprétation puisse permettre d'établir un lien entre la teneur en eau du sol et son comportement.

Les résultats obtenus à partir de ces essais permettent de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau.

La plasticité met en jeu la possibilité, pour certains éléments du solide, de glisser sous l'effet des contraintes. Il y a formation de nouvelles liaisons, la matière n'est pas affaiblie, mais les atomes ne reviennent plus dans leur position initiale. Contrairement à la déformation élastique, la déformation plastique est irréversible et l'énergie emmagasinée irrécupérable. Les mécanismes de la déformation plastique d'une argile dépendent des propriétés électromécaniques de la couche d'eau absorbée à la surface des particules et notamment des glissements eau liée/eau liquide.

Autrement dit, lorsque la teneur en eau augmente dans un sens donné, ce dernier passe graduellement d'un matériau fragile à un matériau plastique, puis à un liquide visqueux. Les limites séparant ces différents états sont : la limite de retrait W_r , la limite de plasticité W_p et la limite de liquidité W_l .

Le fait même que les limites d'Atterberg s'expriment par des teneurs en eau montre bien l'importance de l'eau dans le phénomène de plasticité des argiles.

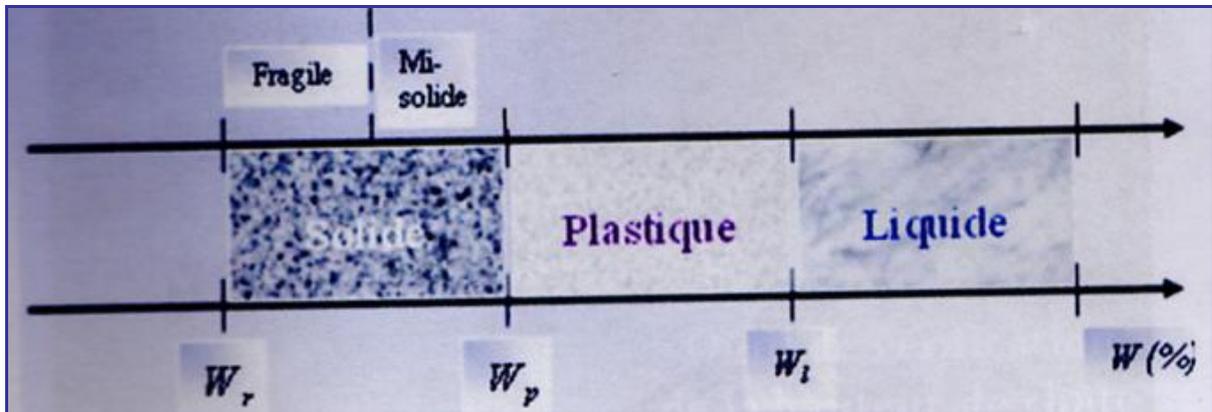


Fig N°06 : schéma du comportement mécanique typique des états du sol.

Les limites d'Atterberg n'autorisent aucun calcul technique. Cependant, couplées avec une analyse granulométrique, obtenues en laboratoire à peu de frais, elles permettent d'avoir une idée du type de sol et des difficultés qu'il risque de se poser en fonction de tel ou tel problème. En effet, la classification de Casagrande (indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité) peut révéler (sous réserve de la bonne exécution de l'essai) par exemple une argile gonflante (montmorillonite) ou une argile thixotropique (qui se liquéfie lorsqu'elle est soumise à une vibration particulière). Toutes deux sont susceptibles de provoquer d'importants désordres si elles ne sont pas détectées. La classification AFNOR pour les sols fins est aussi fréquemment utilisée.

➤ Préparation de l'échantillon :

Pour déterminer ces limites, on prend d'abord un échantillon représentatif du sol et on le met à imbiber dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures. Ensuite, on tamise ce matériau imbibé par voie humide sur un tamis de 0.4 mm, l'ensemble du tamisat et des eaux de lavage étant ensuite décanté pendant 12 heures. L'eau claire surnageante est siphonnée en prenant garde de ne pas entraîner de particules solides fines, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à 50 °C jusqu'à obtenir un mortier mou.

II.1.3.1 Limite de liquidité :

A l'origine, les limites d'Atterberg étaient plutôt arbitraires et les résultats difficilement reproductibles. Casagrande a contribué à la normalisation des essais d'Atterberg et a mis au point un appareil qui porte son nom (figure 7) et qui permet de mesurer la limite de liquidité. Il est arrivé à définir la limite de liquidité comme la teneur en eau à laquelle une entaille (rainure) faite à l'aide d'un instrument normalisé (outil à rainurer) dans une pâte remaniée, mis en place à la spatule de façon bien homogène de telle sorte que l'épaisseur au centre soit de 15 à 20 mm et le pourtour étant sensiblement horizontal, se referme sur une longueur de 10 mm après 25 chutes (figure 8), en tournant la manivelle, d'une coupelle retombante d'une hauteur de 10 mm sur une base de caoutchouc durci ou de bois dur. Casagrande a démontré que la teneur en eau correspondant à la fermeture variait linéairement en fonction du logarithme du nombre de coups nécessaire (cela est surtout pour un nombre de chocs compris entre 15 et 35). Il a exprimé cette variation par une droite qui s'appelle *droite d'écoulement*. La teneur en eau à laquelle la droite croît $N = 25$ coups définit la limite de liquidité.

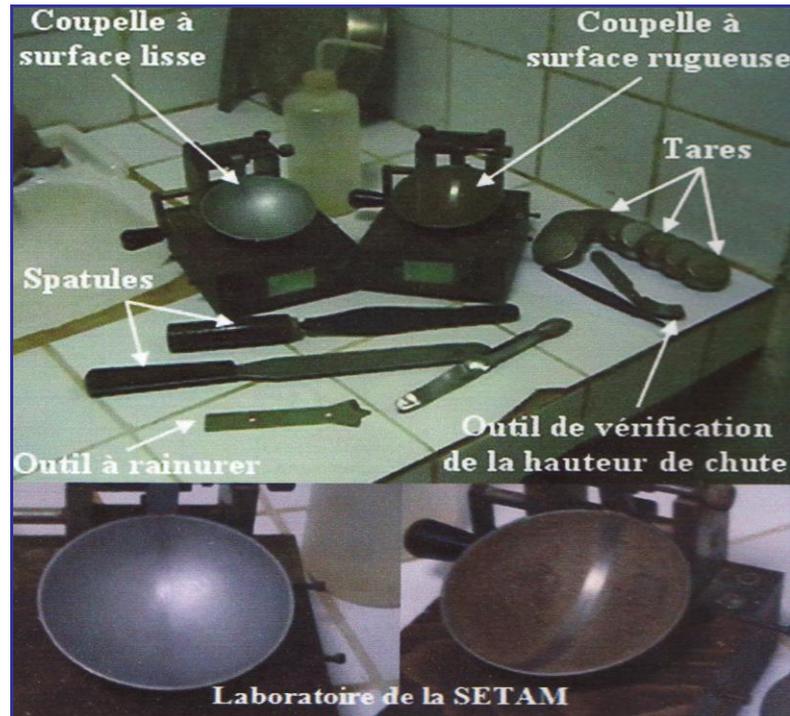


Fig N°07 : Appareil de Casagrande.



Fig N°08 : Détermination de W_l . Fig N°09 : Détermination de W_p .

<p>Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol remanié placé dans une coupelle doit se refermer sur à peu près un centimètre sous l'effet d'environ 25 chocs répétés.</p>	<p>Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.</p>
---	---

On utilise, parfois, la limite de liquidité en un point, en se basant sur le principe selon lequel la pente des droites d'écoulement est la même pour les sols de même origine géologique. Cette méthode consiste à déterminer pour un échantillon, la teneur en eau W_N correspondante à la fermeture de la rainure après un nombre N de coups à l'aide de la formule approchée suivante : $W_l = W_N [N / 25]^{0.121}$

Cette formule représente assez bien les résultats expérimentaux. On peut donc employer cette dernière formule pour déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

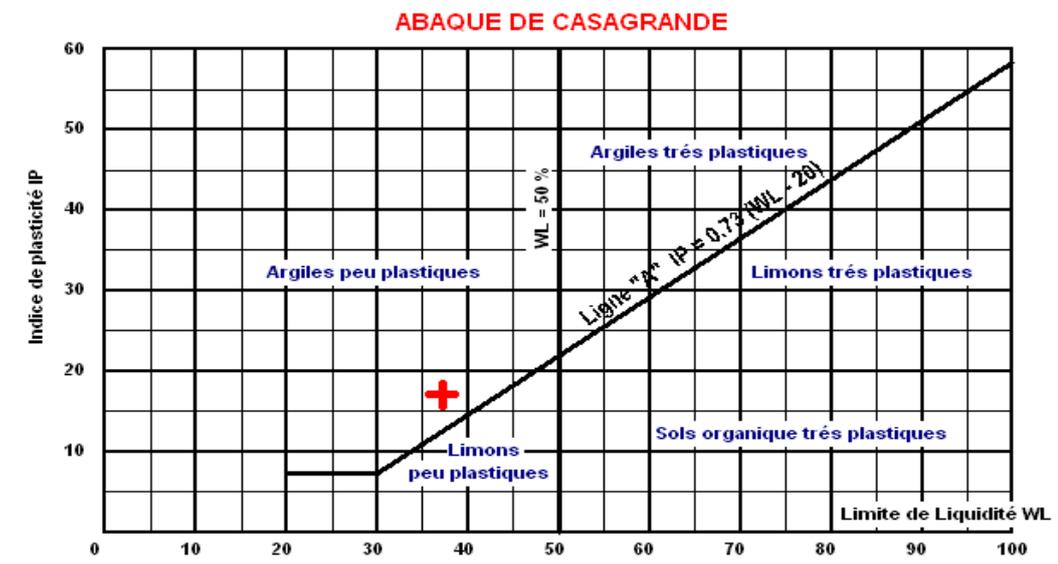


Fig N°10 : Abaque de Casagrande [2]

II.1.3.2 Limite de plasticité :

L'essai de la limite de plasticité est en quelque sorte arbitraire et la précision des résultats est liée à l'expérience du manipulateur. La limite de plasticité est définie comme la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol roulé sous forme d'un fuseau qu'on amincit progressivement (figure 9) commence à se fragmenter ou à se briser en petits morceaux de 3 mm de diamètre, sans pouvoir obtenir de rouleaux plus fins. On exécute généralement deux essais pour déterminer cette limite. Si le diamètre du cylindre peut être déduit, c'est qu'il est trop humide ($W > W_p$), s'il se fragmente avant que son diamètre atteigne 3 mm, c'est qu'il est trop sec ($W < W_p$).

Ces mesures sont assez précises, W_l et W_p sont déterminées avec une erreur relative de 5% environ, ce qui est remarquable, étant donnée la façon dont s'exécute la mesure de la limite de plasticité. De plus, pour un même opérateur, l'erreur relative ne devrait pas dépasser 2%.

II.1.3.3 Indice de plasticité :

Atterberg a défini l'indice de plasticité, comme étant la gamme des teneurs en eau à l'intérieur de laquelle, le sol se comporte comme un matériau plastique. L'indice de plasticité I_p est donc égal à la différence entre la limite de plasticité et celle de liquidité :
 $I_p = W_l - W_p$.

La valeur de I_p est très utile pour la classification des sols à grains fins. Selon les recommandations françaises, on peut apprécier la plasticité de l'argile selon la valeur de I_p conformément au tableau 1.

I_p (%)	Degré de plasticité
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau N°01 : Classification des argiles selon la valeur de son indice de plasticité.

Cette notion d'indice de plasticité a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière. Casagrande a montré en étudiant les sols américains qu'il existait une relation de la forme : $I_p = a W_L + b$.

Pour tous les sols provenant d'une même formation géologique, a varie de 0.7 à 0.8 et b de 13 à 17. Cette constatation a été confirmée pour les sols français et espagnols, qui sont bien représentés par la formule : $I_p = 0.7 W_L - 9$.

II.1.3.4 Indice de consistance et de liquidité :

Si la détermination des limites d'Atterberg n'a qu'une portée limitée, elles permettent néanmoins de se faire une idée de la structure d'une argile naturelle de teneur en eau W par le calcul de son indice de consistance I_c ou son indice de liquidité I_l :

$$I_c = W_L - W / I_p \quad \text{et} \quad I_l = W - W_p / I_p = 1 - I_c$$

La consistance de l'argile peut être appréciée en fonction de I_c selon le tableau 2.

I_c (%)	Consistance de l'argile
< 0	Etat liquide
0 – 25	Très molle
25 – 50	Molle
50 – 75	Mi-consistante
75 – 100	Consistante
> 100	Très consistante

Tableau N°02 : Classification des argiles selon la valeur de son indice de consistance.

II.1.3.5 Densité relative :

Dans le cas des sols pulvérulents (sables et graviers), on a l'habitude d'exprimer la relation entre l'indice des vides naturel et les valeurs limites de cet indice e_{\min} et e_{\max} .

La densité relative est caractérisée par l'indice de densité que l'on peut exprimer par :

$$I_d = e_{\max} - e / e - e_{\min} .$$

Selon les mêmes recommandations, on peut classer les sols pulvérulents d'après leurs indices de densité, selon le tableau 3.

I_d (%)	Etat de densité
< 15	Très lache
15 – 35	Lache
35 – 65	Moyen
65 – 85	Dense
85 - 100	Très dense

Tableau N°03 : Classification des sables et graviers selon la valeur de leurs indices de densité.

II.1.4 Essai au bleu de méthylène – méthode dite « à la tache » :

Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physico-chimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau appelée activité ; ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou *VBS*, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassements.

Autrement dit, cet essai consiste à déterminer le pouvoir d'adsorption des matériaux argileux par dosage au bleu de méthylène.

Les argiles sont emplies de défauts qui provoquent des déficits de charges électriques. Ils affaiblissent les forces de liaisons entre les feuillets. Ces derniers peuvent alors facilement s'écarter, se séparer de telle façon que l'eau puisse accéder aux espaces interfoliaires. Les argiles ont de plus une surface spécifique interfoliaire (dite surface interne) et une surface externe (bords des particules) très importantes.

Ces surfaces sont chargées électriquement et peuvent alors attirer les cations, lorsque l'argile est en contact avec une solution ionique. C'est le cas du bleu de méthylène. La valeur de bleu *VBS* est la masse de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire de ce colorant les surfaces de toutes les particules argileuses incluses dans une masse du sol étudié. Cet essai peut en cas de quantité de matériau insuffisante, être remplacé par une teneur en fines. Il est indispensable de connaître la teneur en eau naturelle *W* du sol.

➤ Prélèvement de l'échantillon :

Le prélèvement nécessaire à l'essai est fonction du diamètre D_{\max} du matériau :

- Si $D_{\max} > 50$ mm, on prélève 10 Kg de sa fraction 0 / 50 mm et on opère tel qu'indiqué ci-dessous ($5 \text{ mm} < D_{\max} < 50 \text{ mm}$).

- Si $5 \text{ mm} < D_{\max} < 50 \text{ mm}$, on prélève une masse humide, m , telle que, $m > 200D_{\max}$ (m en gramme et D_{\max} en mm). On extrait la fraction 0 / 5 mm par tamisage (et par lavage si nécessaire). On détermine la proportion pondérale C de la fraction 0 / 5 mm par tamisage sèche contenue dans le matériau (ou dans la fraction 0 / 50 mm lorsque $D_{\max} > 50$ mm) et on opère tel qu'indiqué ci-dessous.

- Si $D_{\max} < 5$ mm, on prélève une masse humide, m , telle que $m > 200 D_{\max}$. après quartage, on prépare trois prises d'essais de 30 à 60 g pour des sols très argileux à argileux et supérieur à 60 g pour des sols moyennement à peu argileux. La première prise de l'essai de masse m_{h1} est utilisée pour la détermination de la valeur au bleu de méthylène. la deuxième de masse m_{h2} sert à déterminer la teneur en eau de l'échantillon d'essai, tandis que la troisième, de masse m_{h3} , sert à faire face à l'éventualité d'une deuxième détermination de la valeur de bleu.

L'essai est donc effectué sur la fraction granulométrique 0 / 5 mm du matériau. En effet, ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 0.002 mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

Cinématique du dosage	Commentaires
1. Ajout de 5 cm ³ de bleu puis aller en 2.	1 ^{ère} phase : addition de bleu de méthylène par pas grossier (5 cm ³) suivi du test de la tache au bout de 1 min ± 10s.
2. test de la tache au bout de 1 min ± 10s - Test négatif → retour à 1. - Test positif → aller en 5.	si le test est positif avec moins de 10 cm ³ de bleu de méthylène, recommencer l'essai avec une prise d'essai plus importante.
3. Ajout de 2 cm ³ de bleu puis aller en 4.	2 ^{ème} phase : au premier test immédiat positif, on ajoute le bleu par pas fin (2 cm ³) car la suspension est en voie de saturation.
4. Test immédiat de la tache après 1 min - Test négatif → retour à 3. - Test positif → aller en 5.	
5. Effectuer 5 fois la confirmation du test toutes les minutes pendant 5 min : - Test négatif → retour à 3. - Test positif → fin de dosage.	3 ^{ème} phase : confirmation du test positif pendant 5 min.

Tableau N°04 : Procédure de réalisation de l'essai au bleu de méthylène [3]

L'échantillon de masse m_{h1} est mis à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisée et dispersé avec un agitateur à ailettes tournant à (700 ± 100) tr / min pendant au moins 5 minutes, et jusqu'à la disparition de tout agglomérat de matériau. Le tout est maintenu en agitation permanente, pendant toute la durée de l'essai, à une vitesse de (400 ± 10) tr / min.

➤ Test à la tache :

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile.

Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation.

On prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre maintenu horizontalement en l'air (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm).

Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu : le test est positif.

➤ Procédure de l'essai :

La procédure de l'essai est indiquée au tableau 4.

➤ Expression des résultats :

Les résultats sont exprimés comme suit :

- Teneur en eau de l'échantillon : $W = m_{h2} - m_{s2} / m_{s2}$.
- Masse sèche de la prise d'essai : $m_0 = m_{h1} / (1 + W)$.
- Masse de bleu introduite (solution à 10 g / l) : $B = V \times 0.01$
- Valeur de bleu pour des matériaux tels que $D_{max} < 5$ mm : $VBS = (B / m_0) 100$.
- Valeur de bleu pour des matériaux tels que $D_{max} > 5$ mm : $VBS = (B / m_0) C 100$.

Dans les deux cas, la valeur de bleu du sol, VBS , est exprimée en gramme de bleu pour 100 g de matériau sec.

La valeur de bleu quantifie ainsi le degré d'argilosité du sol. Il consiste l'un des paramètres importants de la classification des sols vue des travaux de terrassement.

La valeur de bleu est le rapport du volume de bleu utilisé par la masse sèche M de l'échantillon (ou $M = M_h \times 100 / (100 + W)$, avec M_h la masse humide de l'échantillon).

➤ Classification des sols après essai :

La valeur de bleu *VBS* permet d'attribuer au matériau un nom issu par exemple de la classification AFNOR pour les sols fins, de même que les indices et les limites d'Atterberg (tableau 5).

<i>VBS</i>	Classe du sol.
0.1	Sol insensible à l'eau.
0.2	Apparition de la sensibilité à l'eau .
1.5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
2.5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
6.0	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux .
8.0	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Tableau N°05 : Classification des sols selon le *VBS* [4]

II.1.5 Equivalent de sable :

➤ But de l'essai :

Cet essai, utilisé de manière courante, pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, l'est aussi pour les sols, mais, dans ce cas, son importance est moindre ; le paramètre le plus significatif étant la valeur du bleu du sol. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable, qui quantifie la propreté de celui-ci.

➤ Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0 / 5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide, afin de ne pas perdre d'éléments fins.

On lave l'échantillon (de la même manière utilisée pour la granulométrie) et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins.
- Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = (h_2 / h_1) 100.$$

Selon la hauteur h_2 qui est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine *ESV* (équivalent de sable visuel) ou *ES* (équivalent de sable au piston).

Les conditions opératoires ont une influence importante sur le résultat. Il convient donc de suivre celle-ci scrupuleusement.

L'essai est effectué sur 120 g de grains secs. Il est préférable d'utiliser un échantillon humide, ce qui évite de perdre les éléments fins du sol. Après détermination de la teneur en eau du sol W , on pèse un échantillon humide de masse égale à $120(1 + W)$ grammes (W étant exprimée en %).

On utilise une solution lavante, qui permet de séparer les éléments fins argileux et on provoque la floculation. Elle est préparée à partir d'une solution concentrée composée de 111 g de chlorure de calcium anhydre (à 1 g près), 480 g de glycérine à 99% de glycérol de qualité pharmaceutique (à 5 g près et 12 à 13 g de solution aqueuse à 40% en volume de formaldéhyde de qualité pharmaceutique).

La solution concentrée est stockée en doses de 125 cm^3 dans des flacons en polyéthylène.

La solution lavante, utilisée dans l'essai, s'obtient en diluant une dose de 125 cm^3 de solution concentrée dans 5 l d'eau distillée. Celle-ci se conserve pendant 2 à 4 semaines.

➤ Conduite de l'essai :

On place d'abord cette solution dans une bombonne de 5 l située à 1 m au dessus du fond des éprouvettes ; le dispositif siphonique est amorcé et il est relié au tube laveur. Puis, on dispose de deux éprouvettes propres pour chaque sable étudié ; on prendra la moyenne des deux résultats obtenus. On remplit les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait et on verse la quantité de sable voulue (après tamisage à 5 mm), en veillant à éliminer les bulles d'air. On laisse reposer 10 min.

Après cette pose, on bouche les éprouvettes et on les agite avec un mouvement rectiligne et horizontal de 20 cm d'amplitude, 90 allers et retours en 30 s (effectuée de manière automatique par la machine).

Puis on lave et on remplit les éprouvettes, avec le tube laveur. Pour cela, on rince le bouchon au- dessus de l'éprouvette, on fait descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette. Et on lave le sable en faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure.

Et enfin, on mesure les hauteurs h_1 et h_2 . La mesure de h_2 n'est pas toujours aisée et l'équivalent de sable ESV , qui en résulte est donc entaché d'incertitude. Ceci conduit à procéder de manière plus précise pour déterminer l'équivalent de sable ES . En utilisant la méthode de mesure au piston comme suit (figure 11) : on descend lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser au contact du sable. On mesure h'_2 .

Ces opérations sont identiques pour les deux éprouvettes réalisées sur chaque sable. Les mesures h_1 , h_2 et h'_2 doivent être faites avec la précision du millimètre.



Fig N°11 : Essai d'équivalent de sable.

II.1.6 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats :

- **But de l'essai :**

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent pas être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

- **Equipement nécessaire :**

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées dont les dimensions (en mm) sont : 80 ; 63 ; 50 ; 40 ; 31.5 ; 25 ; 20 ; 16 ; 12.5 ; 10 ; 8 ; 6.3 ; 5 ; 4 .

- **Forme d'un granulat et coefficient d'aplatissement :**

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- la longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat.
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifie la relation : $G/E > 1.58$

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste en une double opération de tamisage :

- le tamisage classique (analyse granulométrique) sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées, afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires, d / D , dont les dimensions sont, telles que ; $D = 1.25 d$.

De ce fait, les classes de grosseur G ainsi définies sont telles, qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

- les différentes classes granulaires, d / D , ainsi isolées sont tamisées une à une sur des grilles à fentes parallèles, d'écartement $E = d / 1.58$ (ce qui correspond aussi à : $E = D / 2$).

On peut donc associer à chaque classe granulaire, d / D , un tamis à fente correspondant de largeur E, ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i partiels. Il est ensuite possible de déterminer un coefficient d'aplatissement global A.

La correspondance entre classes granulaires, d / D , et grilles à fentes de largeur E est donnée dans ce tableau :

Classes granulaires d / D (mm)	4/5	5/6.3	6.3/8	8/10	10 / 12.5	12.5/ 16	16 / 20	20 / 25	25 / 31.5	31.5/ 40	63 /80
Ecartement E des grilles à fentes(mm)	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	40

Tableau N°06 : Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées [5]

- **Conduite de l'essai :**

On opère comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon représentatif de matériau de masse $M \geq 0.2 D$; D , étant le diamètre maximum des granulats en millimètres, et M_0 la masse de l'échantillon, exprimée en Kg.

L'échantillon est tamisé de telle manière, que tous les grains inférieurs à 4mm et supérieurs à 80mm soient mis de côté et pesés. La masse M restante est utilisée pour déterminer le coefficient d'aplatissement A .

Le tamisage est effectué, et chaque fraction d / D est pesée au gramme près, puis tamisée sur le tamis à fentes d'écartement E correspondant (tableau ci-dessus). Le passant à travers chaque grille est pesé au gramme près.

- **Expression du coefficient d'aplatissement A :**

Pour une classe granulaire d / D donnée, on peut définir un *coefficient d'aplatissement partiel* : $A_i = (M_{e_i} / M_{g_i}) 100$

Avec M_{g_i} = masse de la classe granulaire d / D ,

M_{e_i} = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le *coefficient d'aplatissement global* A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \sum M_{e_i} / \sum M_{g_i}$$

II.1.7 Essai MICRO-DEVAL :

- **But de l'essai :**

L'essai « MICRO- DEVAL » permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des granulats.

Il vise à caractériser les granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

- **Principe de l'essai :**

- l'essai est réalisé dans un cylindre contenant : le matériau, la charge abrasive et l'eau.
- L'essai consiste à placer un échantillon de granulats dans un cylindre métallique tournant à une vitesse de 100 tours/min pendant deux heures de temps. Cette durée dépend de la machine utilisée et des charges abrasives ; le principe de l'essai est de mesurer les éléments

inférieurs à 1.6 mm produits par fragmentation due aux charges abrasives et par frottement dans la machine MICRO-DEVAL.

La résistance à l'attrition s'exprime par un coefficient dit : « Coefficient MICRO-DEVAL en présence d'eau ».

$$\text{MDE} = (\rho / p)100$$

p : le poids du matériau soumis à l'essai.

ρ : le poids des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai.

➤ un moteur assurant aux cylindres une vitesse de rotation régulière de (100 ± 5) tr/min.

- **Exécution de l'essai :**

- **Essai sur les gravillons compris entre 4 et 14 mm :**

Introduire dans le cylindre d'essai par une ouverture vers le haut, la charge abrasive, puis les 500g de matériau préparé suivant les dispositions de la partie précédente (préparation de l'échantillon). La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 - 6.3	2000 ± 5
6.3 - 10	4000 ± 5
10 - 14	5000 ± 5

Tableau N°07 : les indications des charges abrasives par leurs classes granulaires [6]

- Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoute 2.5 l d'eau.
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de 100 ± 5 tr / min pendant 2 heures.
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac, en ayant soin d'éviter les pertes de granulat.
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre. En recueillant l'eau et les parties minimales entraînées.
- Tamiser le matériau dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple).procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près, soit m le résultat de la pesée.

➤ **Essai sur les granulats compris entre 25 et 50 mm :**

Introduire dans le cylindre d'essai par une ouverture vers le haut, les 10 000g de matériau préparé suivant les dispositions de la partie précédente (préparation de l'échantillon).

- pour effectuer l'essai en présence d'eau on ajoute 2 l d'eau.
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de 100 ± 5 tr/min pendant 2h 20min.
- Après essai, recueillir le granulat dans un bac, en ayant soin d'éviter les pertes d'élément.
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant dans le bac l'eau et les parties minimales entraînées.
- Tamiser le matériau du bac sur le tamis de 1.6 mm en prévoyant un tamis de séchage.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau en procédant en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve réglée à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.

Le coefficient MICRO-DEVAL est par définition le rapport : $100(m / M) = 100(M - m' / M)$

Ou M : la masse sèche de l'échantillon pour essai (500 ou 10 000g).

$M = M - m'$: la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6 mm.

II.1.8 Essai LOS ANGELES :

• **But de l'essai :**

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulat.

• **Pricipe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite, en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles, telle qu'elle est décrite dans la présente norme.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires :

4-6.3 mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; 16-31.5 mm ; 25-50 mm.

Les conditions que doivent remplir certaines de ces classes sont :

- 10-25 mm contient 60% de 10-16 mm.

- 16-31.5 mm contient 40% de 16-25 mm.
- 25-50 mm contient 60% de 25-40 mm.

La masse de la charge de boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité : **$(m / M) 100$** .

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition ,coefficient Los Angeles du matériau.

- **Préparation de l'échantillon :**

- tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- Laver le matériau tamisé et le sécher en étuve à 105°C, jusqu'à l'obtention de la masse constante.

La masse de l'échantillon pour essai sera de $5000g \pm 2g$.

- **Exécution de l'essai :**

- **Mise en place de l'échantillon :**

Introduire avec précaution la charge de boulets de la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse des boulets (g)
4 - 6.3	7	3080
6.3 - 10	9	3960
10 - 14	11	4840
10 - 25	11	4840
16 - 31.5	12	5280
25 - 50	12	5280

- Replacer le couvercle.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations, sauf pour la classe 25-50 mm, où l'on effectue 1000 rotations à une vitesse régulière, comprise entre 30 et 35 tr/min.
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois, afin de faciliter l'opération.

- Laver le refus au tamis de 1.6 mm. Egoutter et sécher en étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée.

Le coefficient Los Angeles est par définition le rapport : **100(m / 5000)**.

Ou $m = 5000 - m'$; est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6 mm, en grammes.

II.2 ESSAIS ROUTIERS :

II.2.1 Contexte :

La teneur en eau d'un sol est le paramètre d'état fondamental de son comportement. Il est nécessaire de pouvoir situer la teneur en eau w_n du sol à l'état naturel par rapport, soit aux limites d'Atterberg w_l et w_p , en exprimant l'indice de consistance $I_c = (w_l - w_p) / I_p$, soit à la teneur en eau optimale pour laquelle le sol est correctement compacté.

La caractérisation des conditions optimales à mettre en oeuvre pour réaliser un bon compactage. et en particulier la définition de la teneur en eau correspondante nécessite une simulation de laboratoire qui permet de définir les conditions opératoires du compactage en place. Simultanément, on étudie l'influence de la teneur en eau sur la portance du matériau après compactage.

Deux essais permettent de définir ces conditions :

- *l'essai Proctor* pour optimiser les conditions du compactage,
- *l'essai C.B.R. (Californian Bearing Ratio)* pour optimiser les paramètres de la portance du sol.

La teneur en eau étant le paramètre essentiel du sol, pour ce qui concerne la recherche des conditions optimales de mise en oeuvre, nous rappelons ci-dessous sa détermination.

II.2.2 Détermination de la teneur en eau d'un sol :

1. Prélever un échantillon, représentatif du sol.
2. Placer le prélèvement sur un verre de montre ou dans un bécher de poids T et peser immédiatement, soit W .

3. Mettre à l'étuve à 105C°, jusqu'à dessiccation complète et poids stable (environ 24 H)
4. Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve, ou après refroidissement dans un dessiccateur, soit W_d .
5. En déduire la teneur en eau w de l'échantillon :

$$w = \frac{(W - T) - (W_d - T)}{(W_d - T)} \times 100$$

w : teneur en eau (exprimé en %) ;

T : poids de la tare,

W : poids de l'échantillon humide, y compris la tare,

W_d : poids de l'échantillon sec, y compris la tare.

Nota :

Le passage à l'étuve peut être remplacé par un passage au four à micro-ondes qui a l'avantage de ne nécessiter que quelques minutes de chauffe. Ceci nécessite toutefois un étalonnage du temps de chauffe en comparant sur une série d'échantillons les résultats obtenus par les deux méthodes. Le séchage est terminé quand la masse du matériau séché ne varie plus lorsque le temps de chauffe augmente. Le temps de chauffe augmente avec la masse de l'échantillon. Y veiller dans la mise au point de celui-ci. Pour quelques dizaines de grammes 10 à 12 minutes de chauffe sont en général suffisantes.

II.2.3 COMPACTAGE :

II.2.3.1 Définition et facteur d'influence :

➤ **Définition :**

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Cette action augmente la compacité du sol, donc resserre la texture du matériau, réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa capacité portante.

L'expérience montre que ce poids volumique sec n'est une caractéristique du sol que dans une certaine mesure, car il varie également avec l'énergie de compactage et la teneur en eau. C'est à l'ingénieur américain Proctor que l'on doit les premières études

systématiques en ce domaine. Il a en particulier examiné dès 1933 l'influence de la teneur en eau et celle de l'énergie de compactage.

Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de y_d en fonction de w , on obtient une courbe en cloche qui présente un point haut que l'on appelle optimum Proctor.

Ce phénomène s'explique facilement : lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profit, de plus elle prend la place de grains solides ; par contre, lorsque la teneur en eau est faible, l'eau a un rôle lubrifiant non négligeable et la densité sèche augmente avec-la teneur en eau.

Sur le versant gauche de la courbe, appelé versant sec, le volume des vides est occupé par de l'eau et de l'air. Sur le versant droit, appelé versant mouillé, l'eau occupe pratiquement tous les vides, ce qui facilite les déformations par cisaillement.

➤ Influence de la nature du sol :

L'allure des courbes de compactage varie avec la nature du sol. Très aplaties pour un sable, elles présentent un maximum très marqué pour une argile plastique.

Lorsque la courbe est aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau, les matériaux de ce genre constituent les meilleurs remblais. De toute manière, il est indispensable pour le chantier de connaître l'ensemble de la courbe et de ne pas se limiter aux seules coordonnées de l'optimum.

➤ Influence de l'énergie de compactage :

En faisant varier l'énergie de compactage, on obtient de nouvelles courbes. Si cette énergie augmente, le poids volumique optimal s'accroît et la teneur en eau optimale diminue.

On rappelle, d'autre part, qu'un calcul simple permet de trouver pour chaque densité sèche la teneur en eau nécessaire pour saturer le matériau. On obtient ainsi la courbe de saturation qui est une hyperbole équilatère.

Cette courbe correspond en principe à un compactage poussé jusqu'à l'élimination complète de l'air contenu dans le matériau. On constate que les diverses courbes de compactage sont sensiblement asymptotiques à cette courbe de saturation. Le diagramme complet est très utile pour conduire correctement un chantier de compactage soigné, dès que l'on a pu établir une correspondance entre le nombre de coups de dame pendant l'essai et le nombre de passes des différents engins.

Il apparaît donc immédiatement, que pour faire des études comparatives ou simplement savoir quelle est la valeur d'un résultat obtenu sur un chantier, il est indispensable de se référer toujours aux mêmes critères de base.

Il y a quelques essais types avec lesquels de très nombreuses ont été réalisées ; il est prudent de toujours utiliser l'un quelconque qui vont être décrits ci-dessous.

II.2.4 Essai Proctor :

➤ Principe de l'essai :

L'expérience montre que, lorsque l'on compacte un sol, suivant un processus normalisé bien défini, à différentes teneurs en eau, on obtient un matériau dont le poids volumique évolue.

Si on représente sur un graphique l'évolution du poids volumique sec γ_d (qui représente la quantité de matière solide par unité de volume) en fonction de la teneur en eau w pour différents essais de compactage, menés de manière strictement identique (en particulier à énergie de compactage constante), on obtient une courbe présentant un poids volumique sec maximum pour une teneur en eau optimale.

Rappel :

- **poids volumique sec** : $\gamma_d = (\text{poids du sol sec}) / (\text{volume échantillon})$,

- **teneur en eau** : $w = (\text{poids sec} - \text{poids humide}) / (\text{poids du sol sec})$.

Il existe donc une teneur en eau particulière w_{opt} , pour laquelle le compactage conduit à un poids volumique γ_d maximum. L'essai Proctor permet de déterminer ces conditions particulières.

➤ Équipement nécessaire :

• Moule Proctor :

C'est un tube métallique cylindrique, ouvrable en deux demi-coquilles, que l'on peut fixer sur une plaque de base, et muni d'une hausse.

Il existe deux moules :

- le moule Proctor (le plus petit), utilisable pour les sols fins.

- le moule C.B.R. le plus utilisé. Il sert aussi pour l'essai C.B.R., d'où son nom, et comporte de ce fait un disque d'espacement, qui en réduit la hauteur utile.

Moule	D (mm)	H(mm)
Proctor	101.6	117
C.B.R	152	152 dont disque d'espacement, épaisseur 25.4mm, soit Hutile = 126.6mm

Tableau N°08 : caractéristiques des moules pour essai Proctor [7]



Fig N°12 Appareillage Proctor et CBR .

• **Dame Proctor :**

C'est un tube cylindrique, avec un mouton actionné par une poignée. Deux dames sont disponibles en fonction de l'intensité de compactage désirée :

- _ la dame P.N. (la plus petite), utilisée pour l'essai Proctor Normal,
- _ la dame P.M., utilisée pour l'essai Proctor Modifié.

Type de dame	D(mm)	P(g)	Hauteur de chute(mm)
P.N	51	2490	305
P.M	51	4535	457

Tableau N°09 : caractéristiques des dames pour essai Proctor [8]

➤ **Préparation de l'échantillon :**

• **Choix du moule :**

Il dépend de la grosseur D des plus gros grains du sol :

- Si $D \leq 5$ mm (et seulement dans ce cas), le moule Proctor est autorisé.

Mais le moule C.B.R. est conseillé.

- Si $5 < D \leq 20$ mm. utiliser le moule C.B.R. Conserver ce sol intact. avec tous ses constituants.

- Si $D > 20$ mm. Tamiser à 20 mm. et peser le refus :
- Si refus $\leq 25\%$ l'essai se fait dans le moule C.B.R.. mais sans y intégrer le refus (échantillon écrêté à 20 mm),
- Si refus $> 25\%$, l'essai Proctor ne peut être fait.

• **Homogénéisation :**

Elle est effectuée à la main ou les éléments pierreux. Briser les mottes mais pas les éléments pierreux.

. **Dessiccation partielle :**

S'il y a des éléments de plus de 20 mm, il faut tamiser, et on ne peut le faire avec un sol humide. Dans tous les cas, il faut amener w à une valeur nettement inférieure à la teneur en eau optimale recherchée, car on fera des essais à des valeurs croissantes de w .

Ne pas sécher rapidement, à température élevée, car il y a risque de modifications irréversibles des structures physiques et chimiques du sol. En pratique, si cela est possible, on laisse sécher le matériau à l'air libre. Dans le cas contraire, le séchage se fait à l'étuve, réglée à $60C^0$.

. **Tamisage :**

- **A 5 mm :** pour un essai avec le moule Proctor. On ne tamise pas réellement. Il suffit d'essayer les plus gros grains : si l'on en trouve quelques uns de plus de 5 mm, le moule Proctor n'est pas autorisé.

- **A 20 mm :** pour un essai avec le moule C.B.R. Tamiser réellement, pour écrêter l'échantillon à 20 mm. Eviter de travailler avec un échantillon complètement sec pour ne pas perdre de fines pendant le tamisage.

. **Teneur en eau correspondant au premier essai :**

Il faut 5 points encadrant le maximum. L'expérience montre qu'une progression de 2 % sur la teneur en eau entre chaque point donne une courbe harmonieuse. Il est donc souhaitable de commencer les essais à une teneur en eau qui se situe environ 4 à 5 % au-dessous de la valeur de w optimale. Si de précédents essais ne permettent pas de prévoir l'ordre de grandeur du maximum, commencer l'essai pour $w = 3$ à 4 %.

➤ **Compactage de l'échantillon de sol :**

Il s'effectue de manière différente, selon qu'il s'agit d'un essai Proctor normal ou modifié.

	Essai Proctor Normal (moule proctor)	Essai Proctor Modifié (moule C.B.R)
Masse de la dame	2.480 Kg	4.535 Kg
Hauteur de chute	305 mm	457 mm
Nombre de couches pour le remplissage du moule	3	5
Nombre de coups par couches	25	55
Diamètre du moule	101.6 mm	152 mm

Tableau N° 10 : Essai proctor, compactage du matériau dans le moule [9]

➤ **Conduite de l'essai :**

1. Assembler moule et embase (pour le moule C.B.R., mettre le disque d'espacement). Mettre un disque de papier filtre au fond du moule, ce qui facilite le démoulage. Peser l'ensemble moule + embase à 5g près (soit P_m). Mettre en place la hausse.
2. Introduire la première couche de sol et la compacter. Scarifier la surface compactée, afin de faciliter la liaison avec la couche suivante.
3. Procéder de manière identique pour les couches suivantes.
4. Après compactage de la dernière couche, enlever la hausse. Le sol compacté doit dépasser le moule de 1 cm environ. Si ce n'est pas le cas, recommencer le remplissage du moule, en augmentant légèrement la quantité de matériau compacté à chaque couche.
5. Araser soigneusement le moule et le nettoyer puis le peser (soit P_h). On veillera au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasée.
6. Oter l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon. L'une en haut et l'autre en bas, et on détermine la teneur en eau w . On prendra la moyenne des deux valeurs obtenues.
7. On obtient ainsi le premier point de la courbe, dont les coordonnées sont :
- en abscisse : w , teneur en eau déterminée en 6.

- en ordonnée : γ_d poids volumique sec qui s'exprime par :

$$\gamma_d = (Ph - Pm) / (1 + w)V$$

V : volume du moule.

Pm : poids du moule et de son embase.

Ph : poids du moule plein de sol à la teneur en eau w

w : teneur en eau du sol compacté dans le moule exprimée en valeur unitaire (exemple : 0.12 et non 12%).

8. Pour les points suivants, augmenter à chaque fois la teneur en eau de 2 % et recommencer les mêmes opérations. De manière pratique, ceci conduit à ajouter les quantités d'eau suivantes :

- moule Proctor, ajouter 50 g d'eau à 2 500 g de sol,
- moule C.B.R., ajouter 110 g d'eau à 5 500 g de sol.

9. Tracer la courbe de la teneur en eau w mesurée après chaque essai en fonction du poids *volumique* γ_d obtenu.

On en déduit la position de l'**Optimum Proctor** et le couple (w_{opt} ; γ_d maxi) correspondant :

- si on a effectué un essai Proctor normal, on a un *Optimum Proctor Normal* ou «**O.P.N.**»,
- si on a effectué un essai Proctor modifié, on a un *Optimum Proctor Modifié* ou «**O.P.M.**».

Nota :

Avant d'arrêter les essais, il faut s'assurer que l'optimum a été atteint et largement dépassé. On observe l'évolution du poids humide du sol compacté dans le moule après arasement.

Avant l'optimum, la variation du poids humide de sol compacté, d'un essai au suivant, est nettement supérieure à la quantité d'eau ajoutée (50 g ou 110 g selon l'essai). Après l'optimum, cette variation est nettement inférieure à la quantité d'eau ajoutée. On constate en effet que la pente de la courbe est plus accentuée dans la partie sèche par rapport à la partie humide.

➤ Détermination de l'Optimum Proctor Normal (O.P.N) :

Deux cas sont possibles :

- essai à énergie modérée ou essai **Proctor Normal**. On détermine le couple γ_d maxi obtenu pour w_{opt} qui est la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal (OPN),
- essai à énergie importante ou essai **Proctor Modifié**. On détermine également le couple γ_d maxi pour w_{opt} (Optimum Proctor Modifié).

Donc, sur un chantier, et en fonction des spécifications du cahier des charges techniques particulières, qui précise si l'essai de référence est un essai Proctor Normal, ou un essai Proctor Modifié, on doit vérifier la teneur en eau naturelle (w_n) des sols à compacter et la comparer à la teneur en eau optimale, obtenue au cours de l'essai de compactage.

Par exemple, pour un essai Proctor Normal :

- si $w_n = w_{opt}$ le compactage est effectué.
- Si $w_n < w_{opt}$ le sol doit être arrosé avant compactage jusqu'à atteindre w_{opt} .
- Si $w_n > w_{opt}$ le sol doit être aéré pour sécher. En cas de mauvais temps, le compacter superficiellement, afin d'empêcher l'eau de pluie de s'infiltrer, puis l'aérer lorsque le beau temps est de retour.

II.2.5 Essai C.B.R : détermination de la portance du sol compacté :

➤ But de l'essai :

Dans les travaux routiers, et en particulier pour la confection des remblais et des couches de forme, on ne peut admettre que de faibles déformations. On détermine donc la portance du sol, c'est-à-dire sa résistance à la rupture, par l'essai *C.B.R.* (*Californian Bearing Ratio*) ou essai de portance californien.

➤ Principe de l'essai :

Au cours de cet essai, le matériau est poinçonné par un piston de 19,3 cm² de section, enfoncé à la vitesse constante de 1,27 mm/min.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm sont alors rapportées aux valeurs 13,35 et 20 kN, qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

L'indice C.B.R. est par convention la plus grande des deux valeurs suivantes :

-Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN) $\times 100/13.35$

-Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) $\times 100 / 20$

La capacité de portance du sol est d'autant meilleure que l'indice C.B.R est plus élevé.

➤ Préparation de l'échantillon :

Le compactage devant être fait dans les conditions de l'essai Proctor Modifié, il faut réaliser l'essai PM, pour pouvoir connaître la teneur en eau optimale et la densité apparente sèche maximale (voir essai Proctor).

On prépare alors le matériau à une teneur en eau égale à w_{opm} , on le pulvérise, en brisant les mottes, mais en prenant soin de ne pas briser les graviers et pierres éventuels. On écrête alors le matériau à 20 mm, en enlevant les grains supérieurs à 20 mm et en les remplaçant par une même masse d'éléments compris entre les tamis de 5 et 20 mm.

➤ Conduite de l'essai :

1. Compacter à la teneur en eau w_{opm} , suivant le processus de l'essai P.M. (moule C.B.R., dame lourde, 5 couches, 55 coups par couche).
2. Araser le moule et déterminer la teneur en eau de la partie ainsi enlevée.
3. Enlever la plaque de base, ôter le disque d'espacement et retourner le moule, pour fixer sur la plaque de base l'extrémité qui était en haut. en interposant une feuille de papier filtre.
4. Peser l'ensemble moule + plaque de base + contenu, à 1g près.

• Imbibition - Mesure du gonflement :

Le but de cette opération est de placer le sol dans les plus mauvaises conditions hygrométriques, qu'il soit susceptible de rencontrer dans la pratique.

Trois 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 faire l'essai à la teneur en eau w_{opm} , qui est celle à laquelle l'échantillon a été préparé.

- 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 h).

- Dans les autres cas, qui sont les plus fréquents, on imbibe l'échantillon pendant 4 jours en suivant le mode opératoire ci-après :

1. On place sur l'échantillon, successivement, un disque de papier filtre, un disque perforé de gonflement et une charge constituée par des disques annulaires de 3,265 g (au moins 2 disques), représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme de terrassement.

2. On met le tout dans un bac rempli d'eau, la plaque de base étant un peu écartée du fond pour permettre le passage de l'eau. Un comparateur tenu par un trépied placé sur le moule mesurera les variations de hauteur de l'échantillon. On remplit d'eau et l'on note la lecture de la mesure donnée par le comparateur au début de l'essai.

Dans le cas normal, laisser l'imbibition se poursuivre pendant 4 jours (96 heures à plus ou moins 1 heure). A la fin de l'imbibition, on note le gonflement.

- **Poinçonnement :**

On utilise une presse qui est munie d'un piston de poinçonnement de diamètre 4.96 cm (section = 19.3 cm²), et qui est pourvue d'un contrôleur de cadence ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements au 1/100^e de mm près.

On place l'échantillon sur le plateau, bien axé sur le piston de poinçonnement. Les charges annulaires sont remises en place (leur trou central laisse le passage au piston de poinçonnement). On amène la tige au contact du sol et quand l'aiguille dynamométrique de la presse commence à bouger, on arrête le mouvement et on met le comparateur à zéro. Puis la presse est actionnée à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1.27mm/min (1/20^e de pouce/min), le mouvement étant régulé, soit de manière automatique, soit en suivant le cadencemètre de la machine. On effectue simultanément les mesures de l'enfoncement et de la force exercée et on note (sans arrêter le poinçonnement) les forces qui correspondent aux enfoncements suivants :

Enfoncement(mm)	0.625	1.25	2	2.5	5	7.5	10	12.5
Temps de mesure	30''	1'	1'40''	2'	4'	6'	8'	10'

- **Mesure de la teneur en eau après imbibition :**

Cette détermination se fait à partir d'au moins 2 prélèvements, que l'on fait de part et d'autre de l'empreinte, dans la région qui a été soumise au poinçonnement. La mesure de la teneur en eau doit suivre immédiatement l'opération de poinçonnement.

- **Expression des résultats :**

Le procès-verbal d'essai comporte les indications suivantes :

Contrôle du poids volumique sec γ_d de l'échantillon compacté.

On a pesé l'ensemble moule + plaque de base + échantillon compacté aussitôt après le compactage. De même, on connaît le poids de l'ensemble moule + plaque de base avant l'essai. On en déduit le poids de l'échantillon compacté et donc le *poids volumique apparent humide* γ connaissant la *teneur en eau* w de l'échantillon. Le poids volumique sec γ_d est alors :

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w)$$

on devrait retrouver le poids volumique maximal de l'essai Proctor Modifié. si la différence correspond à plus de 50 g par dm^3 , il y a eu faute ou erreur, et il faut recommencer l'essai.

- **Conditions d'imbibition :**

Les conditions opératoires doivent être précisées sur le procès-verbal d'essai :

-soit l'échantillon est testé à la teneur en eau w_{opt}

-soit il y a humidification pendant 96 heures

-soit il y a humidification complète (préciser le nombre d'heures).

- **Gonflement pendant l'imbibition :** on l'exprime en «gonflement linéaire relatif», par rapport à l'épaisseur $h = 127$ mm de l'échantillon à l'origine :

$$g = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100$$

Δh : gonflement mesuré.

h : hauteur initiale.

• Détermination de l'indice C.B.R. immersion :

Il correspond à la plus grande des deux valeurs :

-Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN) x 100/13.35

-Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) x 100/20.

Remarque :

Il est nécessaire de tracer, avant détermination de l'indice C.B.R., la courbe effort-déformation du poinçonnement. En effet, un décalage de zéro peut se produire. Il faut alors le corriger.

➤ Variantes possibles de l'essai :

Outre l'indice C.B.R, immersion exposé ci-dessus, il est possible de déterminer l'indice C.B.R. dans d'autres conditions.

.Indice portant immédiat (I.P.I.) :

L'éprouvette est compactée à la teneur en eau (ou à la plage de teneur en eau) pour laquelle on veut évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins de terrassement pendant la durée du chantier.

Le poinçonnement se fait immédiatement après confection de l'éprouvette sans utilisation des charges annulaires.

La teneur en eau réelle de l'éprouvette est déterminée sur l'éprouvette entière par séchage à l'étuve à 105 °C.

• Indice C.B.R. immédiat :

Les conditions sont identiques à l'I.P.I, mais le poinçonnement se fait en chargeant l'éprouvette par les deux surcharges annulaires de 2.3Kg chacune, les quelles représentent la surcharge de la chaussée (dans le cas où la chaussée impose une contrainte supérieure à celle obtenue par les 2 surcharges sur l'éprouvette, prévoir des surcharges annulaires supplémentaires en conséquence).

➤ Exploitation des résultats :

Les aléas combinés des conditions climatiques et donc hydriques qui influent sur les teneurs en eau du sol, et de la mise en œuvre, font qu'il est nécessaire de déterminer les indices C.B.R pour un ensemble de conditions couvrant l'ensemble des cas possibles.

Il convient donc de procéder à une étude C.B.R. selon le processus suivant :

-saturation à 4 jours d'immersion,

-masse volumique sèche obtenues à l'énergie Proctor Normal, à l'énergie Proctor Modifié, à 20% de l'énergie Proctor Normal (11 coups par couche au lieu de 55),

-5 teneur en eau harmonieusement réparties dans une large plage couvrant tous les cas possibles du chantier.

On trace deux graphiques.

La lecture de ces deux graphiques, pour des teneur en eau identiques, permet alors de donner une réponse satisfaisante sur la portance du sol support de chaussée, compte tenu des aléas du chantier.

CHAPITRE III :

DETERMINATION DU TYPE DE

RESEAU ET SPECIFICATION DES

GRANULATS

III.1 DETERMINATION DU TYPE DE RESEAU :

III.1.1 Hiérarchisation du réseau routier national :

- **Le réseau principal noté RP :**

Il se compose des routes reliant :

- les chefs lieux de wilayat.
- Les ports, les aéroports et les postes frontaliers.
- Les principales agglomérations et importantes zones industrielles.

Ce réseau principal se décompose en deux niveaux :

- le réseau principal de niveau 1 (RP1).
- Le réseau principal de niveau 2 (RP2).

Le linéaire total du réseau principal (RP) est de l'ordre de 18400 Km.

III.1.2 Choix du niveau de réseau principal :

- **Réseau principal de niveau 1 (RP1) :**

Il comporte des :

- liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules / jour.
- Liaisons reliant deux chefs-lieu de wilaya.
- Liaisons présentant un intérêt économique et / ou stratégique.

Il s'agit essentiellement d'un réseau composé de routes nationales (RN).

- **Réseau principal de niveau 2 (RP2) :**

Il est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules / jour. Ce réseau est composé de routes nationales (RN), de chemins de wilaya (CW) et de liaisons reliant l'Algérie aux pays voisins.

III.1.3 Choix des structures types par niveau de réseau principal :

Ce choix est fait en relation avec le type de réseau retenu (RP1 ou RP2). Le tableau ci-dessous synthétise l'éventail des structures types disponible dans les fiches techniques de dimensionnement du catalogue.

Niveau de réseau principal (RPi)	Matériaux types	Structures
RP1	MTB(matériaux traités au bitume)	GB/GB, GB/GNT, GB/SG, GB/TUF, GB/AG.
	MTLH(matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL, BCg/GC
RP2	MNT(matériaux non traités)	GNT/GNT, TUF/TUF, AG/AG, SG/SG
	MTB(matériaux traités au bitume)	SB/SG

Tableau N°11 : structures disponibles dans le catalogue [10]

GB : grave bitume, **GL** : grave-laitier, **BCg** : béton de ciment goujonné, **GC**: grave ciment, **GNT** : grave non traitée, **SG** : sable gypseux, **TUF** : encroutement calcaire, **AG** : arène granitique, **SB** : sable bitume.

III.2 DETERMINATION DE LA CLASSE DE TRAFIC :

III.2.1 Définition du poids lourd :

Un poids lourd (PL) est un véhicule de plus de 35KN (3.5 tonnes) de poids total autorisé en charge (RTAC).

III.2.2 Détermination de la classe de trafic (TPLi) :

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic PL/j/sens compté en moyenne journalière annuelle (MJA), sur la voie la plus chargée, à l'année de mise en service.

Le tableau ci-dessous donne par niveau de réseau (RP1 ou RP2), les classes de trafic adoptées.

	TPLi RPi	TPL0	TPL1	TPL2	TPL3	TPL4	TPL5	TPL6	TPL7
PL/j/sens	RP1	-	-	-	150 à 300	300 à 600	600 à 1500	1500 à 3000	3000 à 6000
	RP2	0 à 50	50 à 100	100 à 150	150 à 300				

Tableau N°12 : classes de trafic TPLi adoptées [11]

III.3 DETERMINATION DE LA PORTANCE DE SOL-SUPPORT DE CHAUSSEE :

Les classes et les plages de portance de sols définies dans le tableau ci-dessous ont été obtenues à partir de l'étude statistique effectuée sur les données géotechniques de plus de 10 000 échantillons de sols (Banque de données routières, diverses études-CTTP). La classification des sols supports a été faite selon le système universel USCS.

III.3.1 Présentation des classes de portance des sols :

Ce tableau regroupe les classes de portance des sols par ordre croissant de S4 à S0. cette classification sera également utilisée pour les sol-supports de chaussée.

Portance (Si)	CBR
S4	< 5
S3	5 – 10
S2	10 – 25
S1	25 – 40
S0	> 40

Tableau N°13 : classes de portance des sols Si [12]

III.4 DESCRIPTION DES STRUCTURES TYPES :

III.4.1 Tableaux récapitulatifs concernant les fiches structures :

Types de matériaux	Fiche structure n°	Type structure	Zones climatiques
MTLH(matériaux traités aux liants hydrauliques)	6	GL/GL	I, II
	7	BCg/GC	I, II

Tableau N°14 : réseau principal de niveau 1 (RP1) [13]

Types de matériaux	Fiche structure n°	Type structure	Zones climatiques
MNT(matériaux non traités)	1	GNT/GNT	I, II et III
	2	TUF1/TUF1	II et III
	3	TUF2/TUF2	II et III
	4	SG1/SG1	IV
	5	SG2/SG2	IV

Tableau N°15 : réseau principal de niveau 2 (RP2) [14]

GL : grave-laitier, **BCg** : béton de ciment goujonné, **GC** : grave ciment, **GNT** : grave non traité, **TUF1** : Tuf de classe 1, **TUF2** : Tuf de classe 2, **SG1** : sable gypseux de classe1, **SG2** : sable gypseux de classe 2.

III.5 DONNEES D'ENTREES DU DIMENSIONNEMENT :

III.5.1 Durée de vie :

La durée de vie est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maitre de l'ouvrage, elle correspond à un investissement initial moyen à élevé et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.

Niveau de réseau principal (RPi)	Matériau types	Structures types	Durée de vie (années)
RP1	MTLH(matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL	20
		BCg	25
RP2	MNT(matériaux non traités)	GNT/GNT, SG/SG, TUF/TUF, AG/AG	15

Tableau N°16 : durées de vie adoptées [15]

III.5.2 Données climatiques :

Les données directement utilisées dans le calcul de dimensionnement des chaussées se rapportent :

- à l'état hydrique du sol support.
- Aux cycles saisonniers de température.

Zone climatique	Pluviométrie(mm/an)	climat	Région
I	> 600	Très humide	Nord
II	350 – 600	Humide	Nord,Hauts-plateaux
III	100 – 350	Semi-aride	Hauts- plateaux
IV	< 100	aride	Sud

Tableau N°17 : zones climatiques de pluviométrie [16]

III.5.3 Trafic :

La connaissance du trafic, essentiellement le trafic poids lourds (véhicules de plus de 3.5 tonnes) intervient :

- comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées.
- Dans le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux (MDE, LA), pour la fabrication des matériaux de chaussées.

Pour le calcul du dimensionnement proprement dit, c'est le trafic cumulé sur la durée de vie choisie qui est à prendre en considération. Ceci fait intervenir les notions d'agressivité des poids lourds et de trafic cumulé équivalent (TCEi).

➤ Calcul du trafic cumulé de PL (TCi) :

Le TCi est le trafic cumulé de PL sur la période considérée pour le dimensionnement (durée de vie). Il est donné par la formule suivante :

$$TCi = TPLi \times 365 \times [(1 + i)^n - 1] / i.$$

- **i** = taux d'accroissement géométrique, (pris égal à 0.04 dans le calcul de dimensionnement), ce taux de 4% résulte d'une enquête nationale de trafic réalisée dans le cadre de l'étude du schéma directeur routier national.

- **n** = durée de vie considérée.

➤ **Calcul du trafic cumulé équivalent (TCEi) :**

Le TCEi est le trafic à prendre en compte dans le calcul du dimensionnement, il correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

✚ l'essieu de référence standard en Algérie est l'essieu isolé à roues jumelées de 130 KN (13 tonnes).c'est l'essieu maximum légal.

Le calcul de TCEi qui fait intervenir l'agressivité (A) des PL, est donnée par la formule :

$$TCEi = TCi \times A = TPLi \times \{ [(1 + i)^n - 1] / i \} \times A$$

Cette formule peut être simplifiée comme suit: $TCEi = TPLi \cdot C \cdot A \cdot 10^3$

Avec : $C = 365 \times [(1 + i) / i] \times 10^{-3}$ (appelé facteur de cumul)

A : coefficient d'agressivité des PL par rapport à l'essieu de référence de 13 tonnes.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne les valeurs de C en fonction de i et n :

n (années) \ i(%)	10	15	20	25
2	4.0	6.3	8.9	11.7
4	4.4	7.3	10.9	15.2
7	5.0	9.2	15.0	23.1
10	5.8	11.6	20.9	35.9

Tableau N°18 : valeurs du facteur de cumul C [17]

Les coefficients d'agressivité A ont été calculés conformément à la norme NFP98-082, à partir des histogrammes de charges obtenus lors des différentes campagnes nationales de passages des poids lourds.Les résultats de calculs sont donnés dans le tableau ci-après :

Niveau de réseau principal (R _{Pi})	Types de matériaux et structures	Valeurs de A
RP1	Chaussées à matériaux traités aux liants hydrauliques : GL/GL, BCg/GC	1
RP2	Chaussées à matériaux non traités : GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	0.6
RP1 et RP2	Sol support (calcul de $\epsilon_{z,ad}$)	0.6

Tableau N°19 : valeurs du coefficient d'agressivité A [18]

III.6 GRAVE NON TRAITEE (GNT)

- **Définition :**

Les graves non traitées (GNT) sont définies comme étant des graves 0/D, ne comportant pas de liant.

On distingue deux types de GNT suivant leur mode d'élaboration :

Les GNT de type « A » sont obtenus en une seule fraction (ce type de GNT ne permet pas une optimisation de la granulométrie et n'offre pas de garantie d'homogénéité).

Les GNT de type « B » sont des matériaux provenant du mélange d'au moins deux fractions granulométriques, malaxées et humidifiées en centrale. On les appelle également graves recomposées humidifiées (GRH).

- **Domaines d'utilisation :**

- couches d'assises de chaussées (couche de base et de fondation) pour le réseau RP2
- couche de fondation pour le réseau de niveau 1 (RP1),

NB : il est recommandé de faire appel à l'utilisation des GNT de type « B » pour le réseau principal de niveau 1.

- **Spécifications :** [référence 19]

Caractéristiques physico-mécaniques

Granulométrie : les courbes granulométriques doivent s'inscrire dans le fuseau de spécification 0/31.5 définis ci-dessous.

Fuseau 0/31.5

Tamiset	Tamiset(mm)	40	31.5	20	10	6.3	4	2	0.5	0.2	0.080
(%)	Min	100	85	62	35	25	19	14	5	3	2
	Max	100	100	90	62	50	43	34	20	14	10

Indice de concassage : $I_c = 100\%$

Dureté : Los angeles $\leq 30\%$, micro deval $\leq 25\%$ en couche de base

Los angeles $\leq 40\%$, micro deval $\leq 35\%$ en couche de fondation

Angularité : le coefficient d'aplatissement $\leq 30\%$

Propreté : ES à 10% de fines $\geq 40\%$,

Valeur au bleu de méthylène VB ≤ 2 .

L'indice CBR ≥ 80 pour une couche de base.

CHAPITRE IV :

PARTIE EXPERIMENTALE

IV.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE :

IV.1.1 Par tamisage :

- **Appareillage :**

- Bacs.
- brosses.
- Pinceaux.
- Echantillonneur.
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- Etuve ventilée réglé à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Un dispositif de lavage.
- Série de tamis dont l'ouverture sera de 40mm à 0.080mm.

- **Mode opératoire :**

a) **Choix de l'échantillon :** l'échantillon à prélever doit être représentatif pour pouvoir procéder à l'échantillonnage avec un échantillonneur muni de barrettes réglées au diamètre voulu pour homogénéiser le mélange et obtenir un poids tel que $D \text{ max en mm sera multiplié par } 2$ (façon pratique) ou $200D < P < 600D$ (façon théorique).

b) **Séchage du matériau :** le matériau sera séché à l'étuve jusqu'à dessiccation pendant 24h à une température de 105°C avant de le peser pour obtenir P_s .

c) **Classer les tamis :** Les tamis seront classés par ordre de grosseur croissante normalisée (les modules les plus faibles en bas) inscrire la colonne de tamis sur la feuille de paillasse.

d) **Introduire l'échantillon dans la colonne :** le matériau est déversé à la partie supérieure de la colonne. L'ensemble agité pour faire descendre les plus petits.

e) **Tamiser :** On secoue tamis par tamis au-dessus d'un plateau jusqu'à ce qu'aucun grain ne passe à travers les mailles. Le matériau passé à travers le tamis appelé (tamisât) doit être remis dans le tamis de dimension immédiatement inférieure à celui utilisé.

f) **Peser les refus :** le matériau resté sur le tamis (refus) doit être pesé, ainsi de suite, jusqu'à remplir la feuille de paillasse, dont on y trouvera :

- les refus cumulés en poids (g).

- les pourcentages des refus cumulés.

g) Traçage de la courbe :

- les pourcentages des tamisats cumulés.
- traçage de la courbe :

Pour tracer graphiquement la courbe granulométrique on se sert des colonnes ; Sur les abscisses nous reportons les dimensions et modules des tamis et en ordonnées les pourcentages de tamisât.

h) Interprétation :

Selon l'allure que prend la courbe, plusieurs paramètres nous permettent d'identifier le matériau.

Pour un bon matériau tel que gravier, la courbe doit avoir :

- une forme de S se trouvant dans le fuseau de spécification (une aire délimitée par une courbe maxi et une courbe mini). Ces paramètres sont aussi valables pour le sable, sauf qu'à celui-ci s'ajoute le module de finesse (MF), qui est très important pour la fabrication du béton ; il doit être compris entre : $2,2 < MF < 2,8$.

- Résultat d'essai :

Masse sec totale $Ms_1 = 8000$ grs	Masse de l'échantillon sec après lavage sur le tamis 0.080mm $Ms_2 = 6967$ grs
------------------------------------	--

Ouverture de tamis (mm)	Masse refus cumulés R_i (gr)	Refus cumulés $ri = (100 \cdot R_i / Ms_1)$ (%)	Tamisats cumulés $100 - ri$ (%)	Tamisat cumulés (arrondi) (%)
40	249	3.11	96.89	97
31.5	1734	21.67	78.33	78
20	3370	42.13	57.87	58
10	5353	66.91	33.09	33
6.3	6010	75.13	24.87	25
4	6378	79.72	20.28	20
2	6677	83.46	16.54	17
0.5	6857	85.71	14.29	14
0.2	6921	86.51	13.49	13
0.080	6961	87.01	12.99	13
Poids des passant au dernier tamis $T_n = 2$ grs				

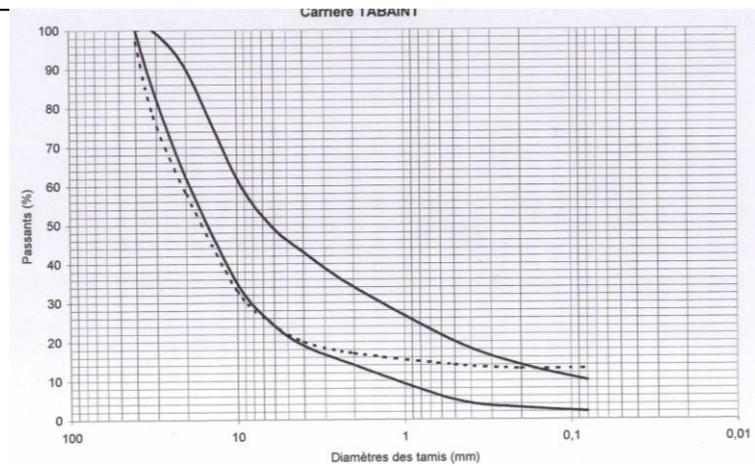


Fig N° 13 : courbe granulométrique de la GNT.

IV.2 LES LIMITES D'ATTERBERG :

- Appareillage :

- Etuve.
- Balance électrique, précision 1/1000 gramme.
- Appareil de Casagrande.
- Outils à rainurer.
- Spatules.
- Boîtes on tare.
- Plaque pour confectionner les rouleaux.
- Tamis.
- Bacs de lavage et pinceaux.

- Mode opératoire :

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche d'argile qu'on moule progressivement avec l'eau, jusqu'à ce qu'on obtienne une masse pâteuse presque fluide. On l'étale à l'aide de la spatule sur la coupelle, de façon à avoir un plan supérieur horizontal.

- On trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de (v), suivant l'axe de symétrie de l'appareil, de telle sorte que l'outil à rainure doit toucher le fond de la coupelle.

La rainure au fond de la coupelle doit être visible.

- On donne à la coupelle des chocs semblables (vitesse constante).

On compte le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, et on inscrit le nombre de coups (N) correspondant

On prend un échantillon (environ 40g) de chaque côté (coté droit et coté gauche par rapport à l'ouverture). On met à chaque échantillon dans la boîte à tare, puis on le pèse, on met les deux boîtes à tare à l'étuve pendant au moins 24 heures, puis on les repèse.

- Résultats d'essai :

Poids de l'eau = poids du sol humide – poids du sol sec.

Teneur en eau W_i (%) = (poids de l'eau / poids du sol sec) 100.

Limite de plasticité $W_p = \sum W_i / N$ avec N = nombre des essais.

Limite de liquidité W_l est tiré à partir de la droite obtenue à 25 coups.

Indice de plasticité $I_p = W_l - W_p$.

Limite de plasticité			
	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
Poids du sol humide	4.72	5.08	4.63
Poids du sol sec	3.99	4.34	3.91
Poids de l'eau	0.73	0.74	0.72
Teneur en eau W_i (%)	18.29	17.05	18.41
Limite de plasticité $W_p = \sum W_i / N = 17.91$ %			

Limite de liquidité à la coupelle de casagrande										
Nombre de choc	15		21		26		33		39	
	Poids du sol humide	16.09	15.17	12.53	13.73	13.16	13.09	16.30	17.22	15.36
Poids du sol sec	12.64	11.88	9.99	10.95	10.57	10.51	13.17	13.88	12.44	12.66
Poids de l'eau	3.45	3.29	2.54	2.78	2.59	2.58	3.13	3.34	2.92	2.96
Teneur en eau W_i (%)	27.30	27.70	25.43	25.39	24.51	24.55	23.77	24.07	23.48	23.38
moyenne	27.50		25.51		24.53		23.92		23.43	
Limite de liquidité $W_l = 24.7$ %										

Indice de plasticité $I_p = W_l - W_p = 6.79$ %

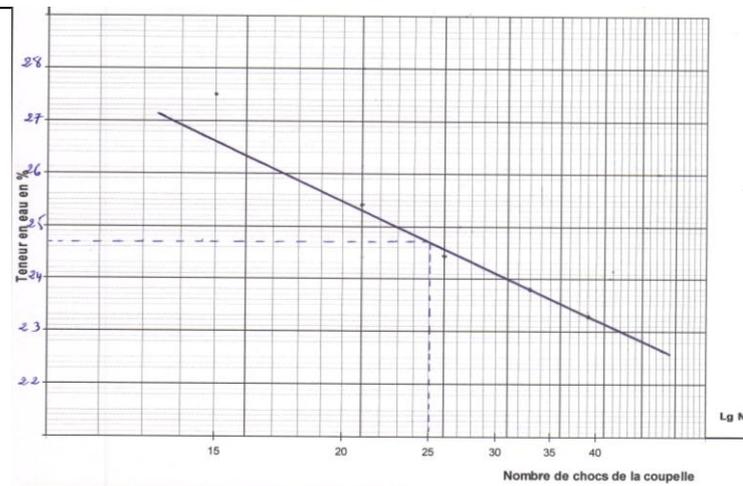


Fig N°14 : détermination graphique de la limite de liquidité

IV.3 EQUIVALENT DE SABLE :

IV.3.1 Equivalent de sable normal (à 14% de fines)

➤ Matériels d'essai :

- Trois éprouvettes cylindriques.
- Un bouchon en caoutchouc.
- Un tube laveur.
- Un récipient de 5 litres muni d'un système de siphonage avec un tube de caoutchouc relié au tube laveur.
- Une solution lavante de 125cl dans les 5 litres d'eau distillée.
- Un chronomètre.
- Un agitateur mécanique ou électrique réglé à 90 coups en 30'.
- Une règle graduée en mm.
- Un piston taré.
- Un entonnoir.
- Une balance.

➤ Mode opératoire :

Cet essai est valable uniquement pour les fractions 0/5 du matériau à étudier.

- On remplit de la solution les trois éprouvettes jusqu'au premier repère, soit 10cm de l'embase.
- On verse une prise de 120g de sable dans chaque éprouvette et on tapote la base du cylindre pour éliminer les bulles d'air enfin de favoriser le mouillage du matériau.

- On laisse le mélange solution + sable reposer pendant 10 minutes.
- Après ce laps de temps on place l'éprouvette sur l'agitateur et on effectue les 90 cycles en 30 secondes.
- Après avoir enlevé le bouchon, on rince les parois de l'éprouvette avec la solution lavante et on enfonce le tube laveur jusqu'au fond de l'éprouvette pour faire remonter les éléments argileux.
- On laisse couler le robinet, pour que la solution atteigne le trait repère supérieur et on la laisse reposer 20 minutes.
- A l'aide de la règle, on mesure H_1 et H_2 .

La mesure de H_2 n'est pas toujours aisée donc l'ESV qui en découle contient des incertitudes. Il faut donc procéder de manière précise pour déterminer l'ES en utilisant le piston.

Descendre le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser au contact du sable. Mesurer alors H'_2 .

Ces opérations sont identiques pour les 3 éprouvettes réalisées sur chaque sable. Les mesures H_1 , H_2 et H'_2 doivent être faites avec la précision du mm.

Remarque :

H_1 = hauteur de l'éprouvette – hauteur d'eau.

H'_2 = hauteur du sable = hauteur de l'éprouvette – hauteur du piston.

➤ Résultats d'essai :

N° Echantillon	Hauteur totale (H_1)	Hauteur de sable à piston (H'_2)	E.S à piston $100 \times H'_2 / H_1$	Valeur moyenne
01	34.9	5.7	16.33	16%
02	35.1	5.5	15.67	
03	34.9	6.1	17.48	

L'équivalent de sable	ESP = 16 %
-----------------------	------------

IV.3.2 Equivalent de sable à 10% de fines :

➤ Généralité :

La propreté d'un sable est mesurée par essai d'équivalent de sable à 10% de fines, s'effectuant sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08mm a été ramenée à 10% à l'aide d'un sable correcteur. Cet essai détermine globalement la qualité des éléments fins en évaluant le rapport conventionnel volumétrique entre les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable à 10% de fines, exprimée par le rapport entre la hauteur de la partie sableuse sédimentée et la hauteur totale du flocculat et de la partie sédimentée.

➤ Appareillage :

- Trois éprouvettes cylindriques
- Un bouchon en caoutchouc.
- Un tube laveur.
- Un récipient de 5 litres muni d'un système de siphonage avec un tube de caoutchouc relié au tube laveur.
- Une solution en flacon de 125cl dans les 5 litres d'eau distillée.
- Un chronomètre .
- Un agitateur mécanique ou électrique réglé à 90 coups en 30'.
- Une règle graduée en mm.
- Un piston taré.
- Un entonnoir.
- Un balance.

➤ Mode opératoire :

- Tamiser le matériau au tamis de 2mm.
- Peser 1500g du tamisat.
- Laver 750g au tamis de 0.080mm puis le placer en étuve (sable correcteur).
- L'autre 750g est un sable naturel.
- Peser 120g pour chaque éprouvette (c'est-à-dire un pourcentage du poids calculé du sable correcteur + le reste jusqu'à 100% du sable naturel).
- Les autres étapes sont les mêmes que le mode opératoire d'équivalent de sable normal.

➤ **Matériau soumis à l'essai :**

L'échantillon prévu pour le laboratoire est préparé suivant les prescriptions données au chapitre traitant la préparation d'un échantillon pour essai.

La masse de l'échantillon est choisie de façon à avoir une fraction passant au tamis de 2mm pesant 1500g environ. Effectuer le quartage de façon à obtenir trois échantillons et ce pour:

- Déterminer la teneur en eau "W".

- Préparer le sable correcteur et déterminer la teneur en fines.

- Préparer des échantillons pour essai. L'essai s'effectue avec le matériau à sa teneur en eau naturelle, la masse sèche de l'échantillon pour essai doit être de $120g \pm 1g$.

En cas où l'échantillon pour le laboratoire ne soit pas humide, l'humidifier avant quartage pour éviter les pertes en fines et la ségrégation.

1. Déterminer la teneur en eau "W", exprimée en pourcentage sur deux prises de 100 à 200g par une méthode rapide: séchage au gaz ou rayonnement infrarouge, et ce, à partir du premier échantillon.

2. Détermination de la teneur en fines et préparation du sable correcteur.

Le deuxième échantillon de masse M_h est passé au tamis de 0.080mm, sous l'eau.

Effectuer le séchage des éléments retenus sur le tamis et leur pesage afin de déterminer la teneur en fines F exprimée en pourcentage du sable. Ce refus servira de sable correcteur.

Si m_s est la masse de ce refus à 0.080mm;

$$f = 100 - [m_s(100 + W) / M_h].$$

La masse " m_{sc} " du sable correcteur (refus sec à 0,08mm) à ajouter pour la préparation d'un échantillon pour essai, exprimée en gramme, est donnée par la formule:

$$m_{sc} = 120 - (1200 / f).$$

• **Préparation des échantillons :**

- Si f inférieur à 11%, le sable correcteur est inutile et l'essai s'effectue directement sur le troisième échantillon. La masse de l'échantillon pour essai est donnée par:

$$\frac{w}{120(1 + \frac{w}{100})}$$

- Si f supérieur à 11 %, l'ajout d'une quantité msc de sable correcteur à la masse du troisième échantillon est nécessaire. La masse de l'échantillon pour essai, en grammes

$$\frac{1200}{f} \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

Dans tous les-cas, préparer deux échantillons pour essai.

➤ **Exécution de l'essai :**

Se baser sur les données du chapitre traitant l'équivalent de sable.

Masse humide = 120 x (100 + teneur en eau en %) / 100.

➤ **Résultat d'essai :**

1/Détermination du pourcentage des fines

Masse de l'échantillon humide (grs)	$M_1 = 700$
Masse de refus au tamis 0.080mm (grs)	$M_2 = 448$
Pourcentage de fines : $100 - M_2/M_1(100 + w)$ (%)	$f = 36$

2/échantillon pour essai

Masse de sable correcteur : $120 - (1200/f)$ (tamisat à 2mm) (grs)	$M_1 = 86.66$
Masse du sable humide : $(1200/f) \times (1 + w)/100$ (tamisat à 2mm) (grs)	$M_2 = 33.34$

Hauteur total (H_1)	Hauteur de sable à piston (H_2)	$ES = H_2/H_1 \times 100$	ES moyen
14.8	8.2	55.40	55.91
15.2	8.1	53.29	
14.4	8.5	59.05	

IV.4 ESSAI BLEU DE METHYLENE :

➤ Appareillage :

- Un agitateur électrique.
- Un bécher.
- Un papier filtre.
- Une burette graduée.
- Un entonnoir.
- Une règle en verre.
- Eau distillée.
- Le bleu de méthylène.
- Une éluve .

➤ Mode opératoire :

- Étuver le matériau.
- Tamiser le matériau dans un tamis de 2mm.
- Peser 200grs.
- Mettre ce dernier dans un bécher puis ajouté le 500ml d'eau distillé.
- Agiter le tout pendant 5min à 700 tr/min.
- Laisser l'agitateur fonctionner et verser successivement le bleu de méthylène.
- Après chaque ajout de 5ml, attendre 1min avant de prendre un prélèvement.
- L'essai s'arrêtera lorsqu'on trouvera sur le papier filtre une oréole bleue ciel entourée.
- Prendre 5 prélèvements pour confirmer que l'oréole est toujours bleue ciel.

Remarque : L'analyse granulométrique de la fraction 0/50 mm est obtenue en annexe 3.

➤ Résultats d'essai :

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/2 en (grs) M1	$M1 = 200\text{grs}$
Quantité totale de la solution de colorant ajoutée (ml) V1	$V1 = 150\text{ml}$
Valeur au bleu MB, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2 mm	$MB = V1/M1 \times 10 = 7.5$
Valeur au bleu VB0/D, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2mm	$VB \ 0/D = V1/M1 \times C \times 10 = 1.95$ C : étant la proportion de la fraction 0/2 mm dans la fraction 0/50 du matériau sec. (C = 0.26).

IV.5 ESSAI MICRO-DEVAL :

- **Appareillage :**

- Appareil de Micro-Deval.
- Tamis de 14 ; 12.5 ; 10 et 1.6 mm.
- charges abrasives.
- Bac.
- Etuve.
- Balance.

- **Mode opératoire :**

- Utiliser trois tamis de 10 ; 12.5 ; 14 mm, (la classe 10 – 14).
- Le poids utilisé est de 500g.
- Prendre 40% du poids des refus de tamis de 12.5 mm.
- Prendre 60% du poids des refus de tamis de 10 mm.
- Laver ce poids (500g) pour éliminer les fines.
- Sécher le pendant 24 heures.
- Mettre dans une cocotte Micro-Deval 2.5 l d'eau + 5000g de charge abrasive, puis mettre les 500g de matériau séché pour éviter l'écrasement.
- Fixer la cocotte sur l'appareil de Micro-Deval .
- Laisser l'appareil tourner pendant 2 heures.
- Laver le matériau dans un tamis de 1.6 mm.
- Mettre ce dernier en étuve pendant 24 heures.
- Peser le matériau à sec.

- **Résultat d'essai :**

Classe granulaire	Poids initial (g)	Masse de la charge abrasive(g)	Poids final (g)	Coefficient Micro Deval (%)
10 - 14	500	5000	347	30.6

IV.6 ESSAI LOS ANGELES :

- **Appareillage :**

- Appareil de Los Angeles.
- Tamis de 25 ; 16 ; 10 et 1.6 mm.
- Bac.
- Etuve.
- Balance de précision.

- **Mode opératoire :**

- Utiliser trois tamis 10 ; 16 ; 25 (la classe 10 – 25).
- Le poids utilisé est de 5000g.
- Prendre 40% du poids des refus de tamis de 16 mm.
- Prendre 60% du poids des refus de tamis de 10 mm.
- Laver ce dernier pour éliminer les fines.
- Sécher le pendant 24 heures.
- Mettre ce poids dans une appareil de Los Angeles + 11 boulets.
- Après 15 minutes de rotation, enlever le matériau.
- Laver ce dernier dans un tamis de 1.6 mm.
- Sécher le (24 heures).
- Peser le matériau après le séchage.

- **Résultat d'essai :**

Classe granulaire	Poids initial (g)	Nombre de boulets	Masse de la charge abrasive(g)	Poids final (g)	Coefficient Los Angeles (%)
10 - 25	5000	11	4840	3330	33

IV.7 ESSAI D'APLATISSEMENT :

- **Appareillage :**

- Grilles de différents écartements : 20 ; 16 ; 12.5 ; 6.3 ; 4 ; 2.5.
- Balance électronique.
- Bac.

- **Mode opératoire :**

- Cet essai se pratique en même temps que l'analyse granulométrique de la fraction 0/40mm.
- Verser le matériau dans une série de tamis choisis.
- Préparer la série de grilles correspondant.
- Après le pesage du refus de chaque tamis, verser cette quantité dans la grille correspondante.
- Peser le tamisat de chaque grille.

- **Résultat d'essai :**

Mesure du coefficient d'aplatissement :

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles	
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (grs)	Ecartement des grilles (mm)	Passant Me (grs)
31.5 - 40	249	20	0
25 - 31.5	1485	16	81
20 - .25	1636	12.5	237
10 - 12.5	1983	6.3	163
6.3 - 8	657	4	94
4 - 5	368	2.5	45
M = Σ Mg = 6378 grs		Σ Mg = 620 grs	
$A = [\Sigma Me / M] \times 100 = 9.72\%$			

IV.8 ESSAI PROCTOR :

➤ Appareillage :

L'ensemble du matériel est composé :

- Moule PROCTOR. – Truelle.
- Dame. – Règle à araser.
- Tamis (20). –Godet.
- Balance de portée à 25kg graduée au près. –Pinceau.
- Pelle.
- Maillet.
- Bacs.
- Etuve.

➤ Mode opératoire :

- Sécher le matériau dans l'étuve pendant 24 heures avant l'utilisation.
- L'échantillon nécessaire à l'essai est ensuite prélevé par quartage ou de préférence au moyen d'un échantillonneur.
- Tamiser ce dernier dans un tamis de 20 mm ou dans une passoire de 25 mm.
- Peser 6000grs puis les déverser dans un bac.
- Verser un pourcentage d'eau par rapport au poids du matériau utilisé (2%, 4%, 6%,).
- Malaxer le matériau soigneusement pour l'homogénéisation, à la main.
- Partager cette quantité en 5 parts.
- Verser la 1^{er} partie dans le moule et la compacter à une énergie de 55 coups, et continuer la même opération pour les autres parties.
- Calculer la densité apparente du sol, dès que la densité diminue entre deux essais arrêter.
- Déterminer la teneur en eau optimale à partir de la courbe tracer.

➤ Résultat d'essai :

Densité apparente sèche			
Eau ajoutée W(%)	4 %	6 %	8 %
Poids du sol humide (psh)	5295	5515	5455
Poids du sol sec (pss) $pss = psh / [1 + (W/100)]$	5091	5203	5051
Volume du moule(v)	2295	2295	2295
Densité aparente du sol $d = (pss / v).100$	2.22	2.27	2.20

Teneur en eau			
Poids du sol humide (psh)	919	1132	673.4
Poids du sol sec (pss)	884	1070	625
Poids l'eau (psh – pss)	35	62	48.4
Teneur en eau (%) [(psh – pss) / pss]100	3.96	5.80	7.75

Densité seche maximale = 2.27	teneur en eau optimal = 6 %
-------------------------------	-----------------------------

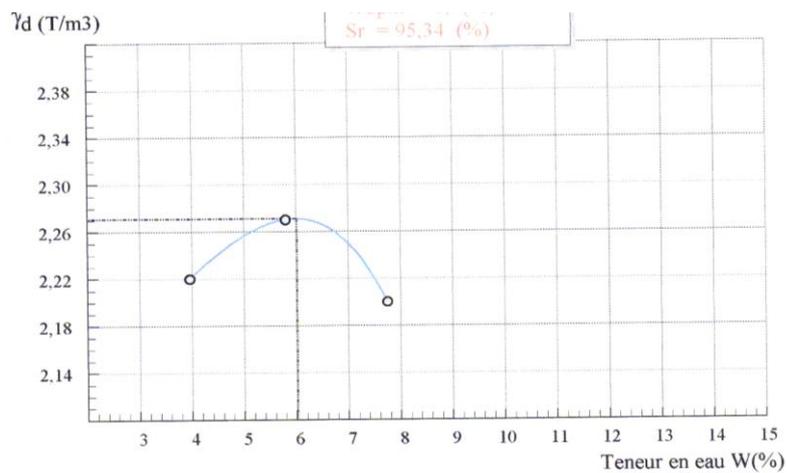


Fig N° 15 : courbe du Proctor sans la chaux.

IV.9 ESSAIS CBR : (INDICE PORTANT CALIFORNIEN)

➤ Appareillage :

- Une presse CBR.
- Une balance.
- Trois moules CBR.
- Plaque d'acier à araser.
- Dame cylindrique.
- Disque d'espacement.
- Disque métallique.
- Bacs.

Remarque :

- Le calcul de l'indice portant se détermine ainsi :
 - la pression qui correspond à un enfoncement de 2.5 mm / 0.70 c'est-à-dire à 2.5mm (2') : $P(2.5) / 0.70$
 - la pression qui correspond à un enfoncement de 5 mm / 1.05 c'est-à-dire à 5mm (4') : $P(5) / 1.05$

la grande valeur entre ces deux correspond aux indices portants.

La pression = la valeur / 19.3 avec 19.3 c'est la surface du piston.

La valeur = la lecture $\times 20.7$ avec 20.7 c'est le coefficient de l'anneau.

➤ **Résultats d'essai :**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (sans la chaux ; 55 coups)

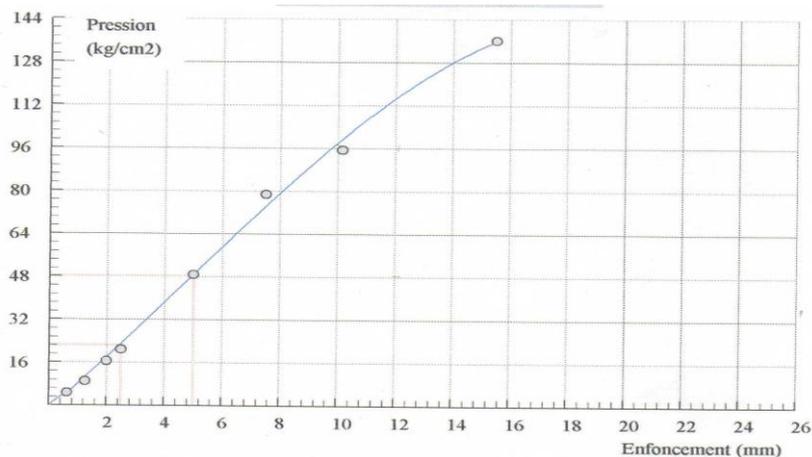
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	1215	Poids du sol humide (psh)	5495
Poids du sol sec (pss)	1145	Teneur en eau w(%)	6.12
Poids de l'eau (psh-pss)	70	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	5178
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	6.12	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.26

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	1300	00	00
Poids du sol sec (pss)	1205	05	01
Poids de l'eau (psh-pss)	95	12	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	7.89	18	03
		21	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	4.5	93.15	4.83
1	1.25	8.5	175.95	9.12
1 40	2	15.5	320.85	16.62
2	2.5	19.5	403.65	20.91
4	5	45.5	941.85	48.80
6	7.5	73.5	1521.45	78.83
8	10	98	2028.60	105.11
10	12.5	127	2628.90	136.21

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 32.52$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 46.21$ **Indice CBR = 46.21****Fig N° 16 : graphe du CBR sans la chaux à 55 coups.**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (sans la chaux ; 25 coups)

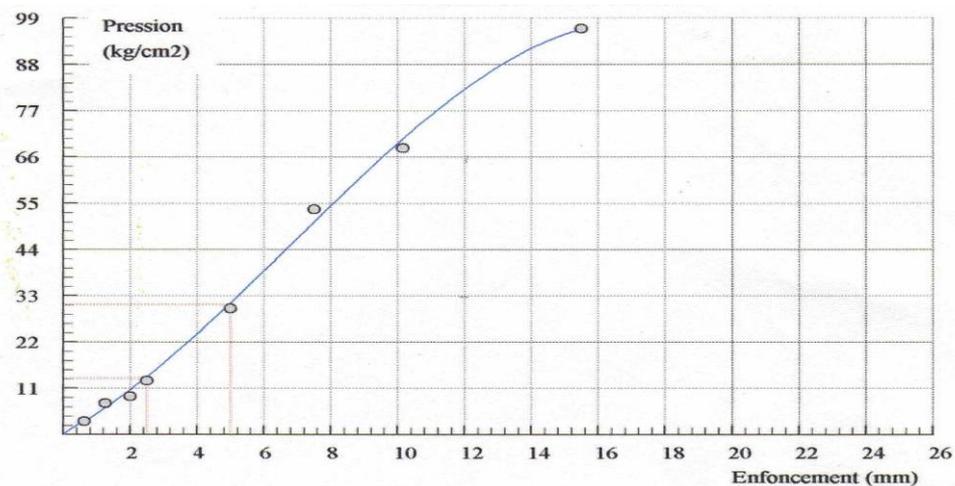
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	1215	Poids du sol humide (psh)	5310
Poids du sol sec (pss)	1145	Teneur en eau w(%)	6.12
Poids de l'eau (psh-pss)	70	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	5003
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	6.12	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.18

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	655	00	00
Poids du sol sec (pss)	595	14	01
Poids de l'eau (psh-pss)	60	20	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	10.09	25	03
		30	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	3	62.1	3.21
1	1.25	7	144.9	7.5
1 40	2	8.5	175.95	9.11
2	2.5	12	248.4	12.87
4	5	28	579.6	30.03
6	7.5	50	1035	53.62
8	10	63.5	1314.45	68.1
10	12.5	90	1863	96.52

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 19.36$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 29.63$ **Indice CBR = 29.63****Fig N° 17 : graphe du CBR sans la chaux à 25 coups.**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (sans la chaux ; 10 coups)

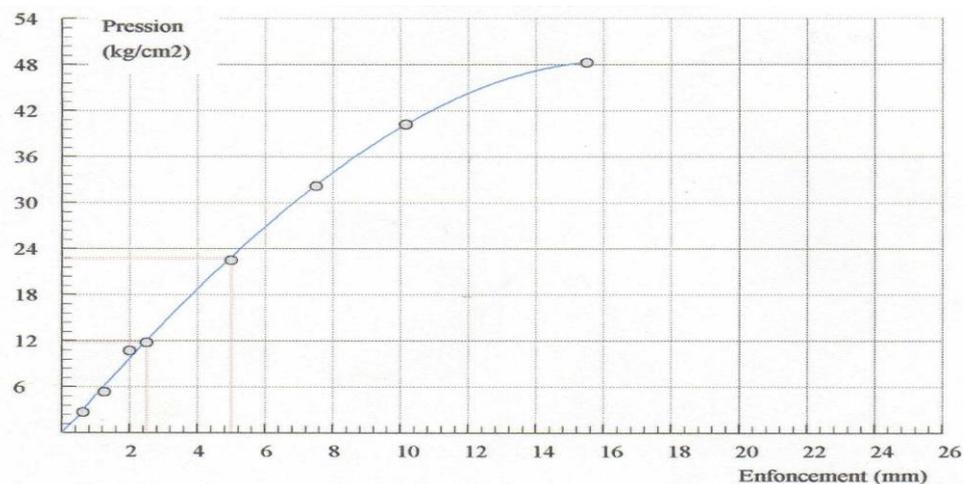
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	1215	Poids du sol humide (psh)	4880
Poids du sol sec (pss)	1145	Teneur en eau w(%)	6.12
Poids de l'eau (psh-pss)	70	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	4599
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	6.12	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.01

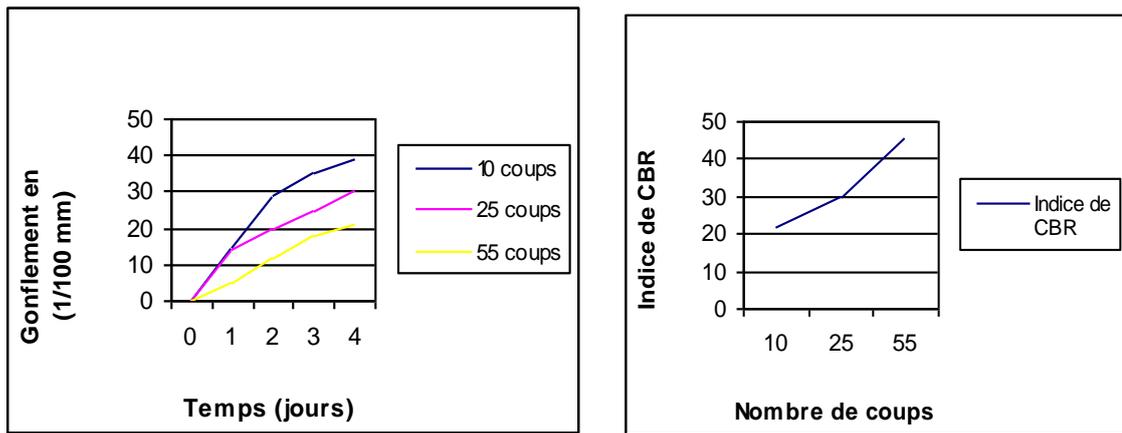
2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	985	00	00
Poids du sol sec (pss)	875	15	01
Poids de l'eau (psh-pss)	110	29	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	12.58	35	03
		39	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	2.5	51.75	2.68
1	1.25	5	103.5	5.36
1 40	2	10	207	10.72
2	2.5	11	227.7	11.80
4	5	21	434.7	22.52
6	7.5	30	621	31.18
8	10	37.5	776.25	40.22
10	12.5	45	931.5	48.26

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 17.05$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 21.74$ **Indice CBR = 21.74****Fig N°18 : graphe du CBR sans la chaux à 10 coups.**



IV.10 TRAITEMENT PAR LA CHAUX :

Après les essais de CBR que j'ai réalisé , j'ai obtenu des indices CBR non conformes avec les normes.

J'ai donc effectué d'autres essais de CBR, avec 6% d'eau mais avec différents pourcentages de chaux (2,4,et 6%), ainsi que ces trois essais avec de 55 coups.

Le but de ce travail a consiste à déterminé le pourcentage de chaux, permettant d'obtenir un indice CBR supérieur à 80.

➤ Les résultats des essais :

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 2% en chaux et 6% d'eau ; 55 coups)

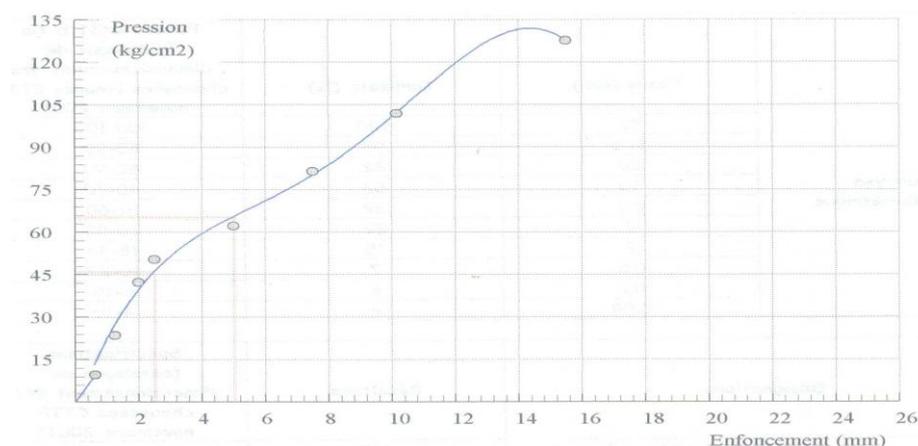
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	170.5	Poids du sol humide (psh)	5570
Poids du sol sec (pss)	161.02	Teneur en eau w(%)	5.89
Poids de l'eau (psh-pss)	9.48	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	5260
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	5.89	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.29

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	1883	00	00
Poids du sol sec (pss)	1743	00	01
Poids de l'eau (psh-pss)	140	00	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	8.03	02	03
		03	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	9	186.3	9.65
1	1.25	22	455.4	23.60
1 40	2	39.5	817.65	42.37
2	2.5	47	972.9	50.41
4	5	58	1200.6	62.21
6	7.5	76	1573.2	81.51
8	10	95	1966.5	101.89
10	12.5	119	2463.3	127.63

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 65.88$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 62.41$ **Indice CBR = 65.88****Fig N° 19 : graphe du CBR à 2% en chaux avec 55 coups.**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 4% en chaux et 6% d'eau ; 55 coups)

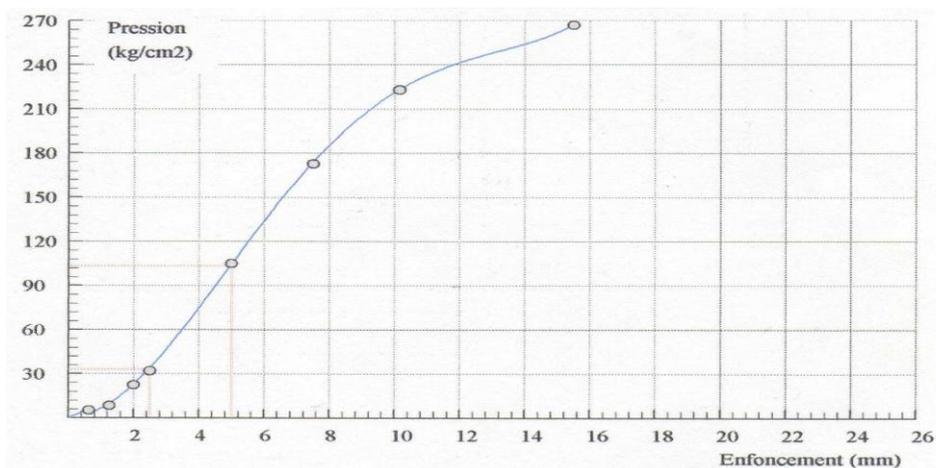
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	82.38	Poids du sol humide (psh)	5170
Poids du sol sec (pss)	80.52	Teneur en eau w(%)	2.31
Poids de l'eau (psh-pss)	1.86	Poids sec calculé $p_{sc} = (psh / [1+(w/100)])$	5053
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	2.31	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.20

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	2610	00	00
Poids du sol sec (pss)	2432	00	01
Poids de l'eau (psh-pss)	178	01	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	7.31	02	03
		04	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	5	103.5	5.36
1	1.25	8	165.6	8.58
1 40	2	21	434.7	22.52
2	2.5	30	621	32.18
4	5	98	2028.6	105.11
6	7.5	161	3332.7	172.68
8	10	208	4305.6	223.1
10	12.5	249	5154.4	267.1

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 47.87$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 99.02$ **Indice CBR = 99.02****Fig N° 20 : graphe du CBR à 4% en chaux avec 55 coups.**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 6% en chaux et 6% d'eau ; 55 coups)

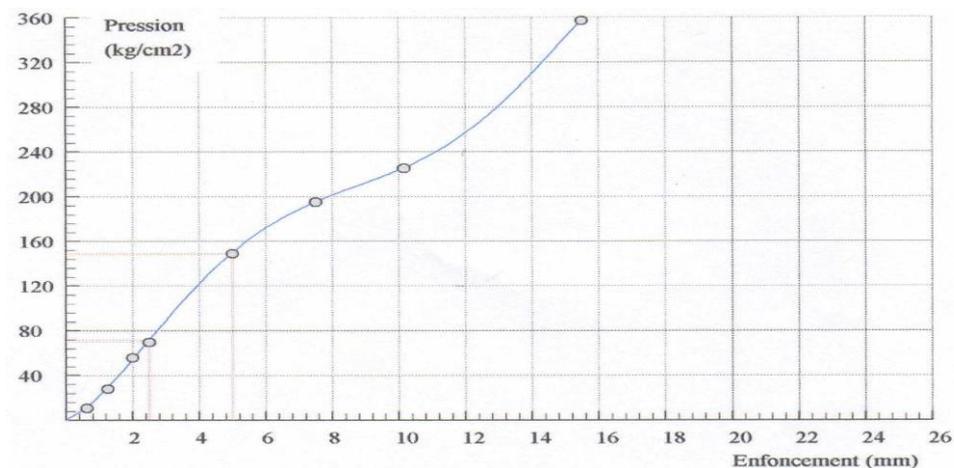
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	62.27	Poids du sol humide (psh)	5005
Poids du sol sec (pss)	60.50	Teneur en eau w(%)	2.92
Poids de l'eau (psh-pss)	1.77	Poids sec calculé $p_{sc} = (psh / [1+(w/100)])$	4863
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	2.92	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.11

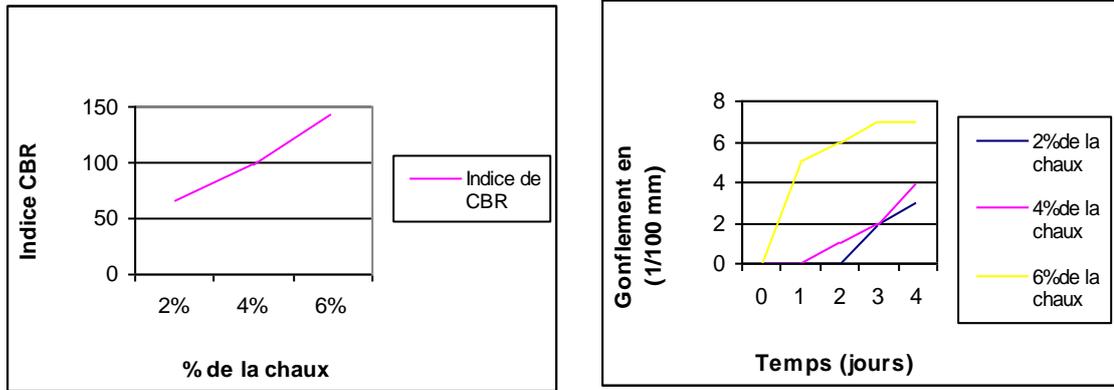
2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	2165	00	00
Poids du sol sec (pss)	2002	05	01
Poids de l'eau (psh-pss)	163	06	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	8.14	07	03
		07	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	10	207	10.72
1	1.25	26	538.2	27.89
1 40	2	52	1076.4	55.77
2	2.5	65	1345.5	69.71
4	5	139	2877.3	149.08
6	7.5	182	3767.4	195.20
8	10	210	4347	225.23
10	12.5	333	6893.1	357.15

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 102.23$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 142.22$ **Indice CBR = 142.22****Fig N° 21: graphe du CBR à 6% en chaux avec 55 coups.**



A partir de ces résultats, on trouve que l'indice CBR à 4 et 6% de la chaux dépasser le 80, mais sur le plan économique on prend 4% de la chaux au lieu de 6%.

Puis j'ai procédé à l'essai Proctor Modifié à 4% de la chaux, pour obtenir la densité maximale et la teneur en eau optimale.

Les résultats sont :

➤ **proctor à 4% en chaux :**

Densité apparente sèche			
Eau ajoutée w (%)	6%	8%	10%
Poids du sol humide (psh)	5125	5325	5380
Poids du sol sec (pss) = $(psh / [1 + (w/100)])$	4835	4933	4888
Volume du moule (v)	2295	2292	2295
Densité apparente du sol $[(pss / v) \cdot 100]$	2.11	2.15	2.13

Teneur en eau			
Poids du sol humide (psh)	1080	1629	1038
Poids du sol sec (pss)	1020	1509	943
Poids de l'eau (psh-pss)	60	120	95
Teneur en eau (%) $[(psh-pss) / pss] \cdot 100$	5.88	7.95	10.07

Densité sèche maximale = 2.15 teneur en eau optimal = 8.30 %

La teneur en eau optimal est obtenue a partir de la courbe.

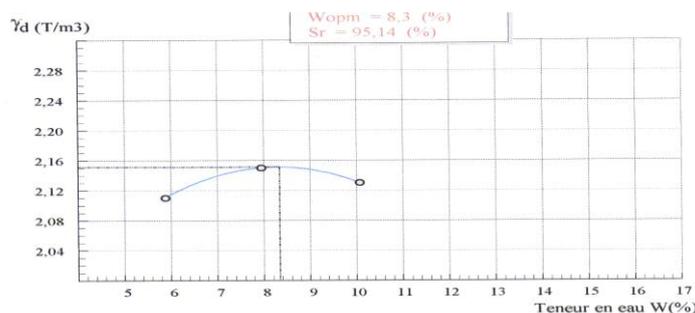


Fig N° 22 : courbe du Proctor avec 4% en chaux.

Lorsqu'on a trouvé la densité maximale et la teneur en eau optimale on réalise donc l'essai CBR à 4% en chaux et 8.30% d'eau, (pour trois moules 55, 25 et 10 coups).

Les résultats sont :

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 4% en chaux et 8.3% d'eau ; 55 coups)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	850	Poids du sol humide (psh)	5345
Poids du sol sec (pss)	785	Teneur en eau w(%)	8.28
Poids de l'eau (psh-pss)	65	Poids sec calculé $p_{sc} = (psh / [1+(w/100)])$	4936
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	8.28	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.15

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	658	00	00
Poids du sol sec (pss)	598	06	01
Poids de l'eau (psh-pss)	60	07	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	10.03	09	03
		12	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	9.5	196.65	10.19
1	1.25	23	476.1	24.67
1 40	2	45	931.5	48.26
2	2.5	52	1076.4	55.77
4	5	110	2277	117.98
6	7.5	157	3249.9	168.39
8	10	188	3891.6	201.64
10	12.5	221	4574.7	237.03

Calcul de l'indice portant

à 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 81.47$

à 5mm : $P(5) / 1.05 = 112.84$

Indice CBR = 112.84

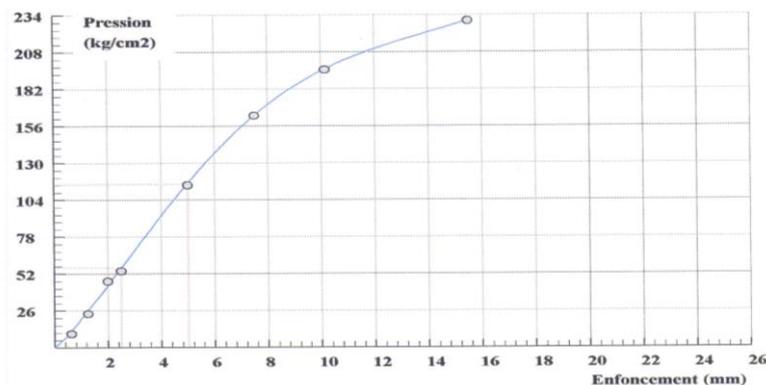


Fig N°23 : graphe du CBR à 4% en chaux avec 55 coups.

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 4% en chaux et 8.3% d'eau ; 25 coups)

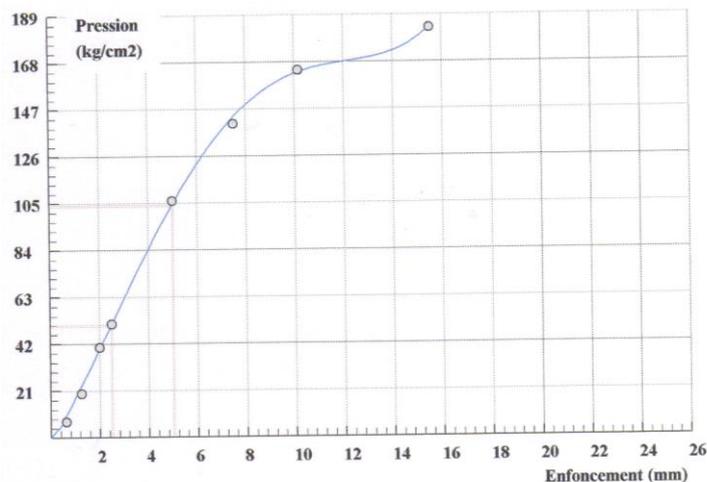
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	850	Poids du sol humide (psh)	5070
Poids du sol sec (pss)	785	Teneur en eau w(%)	8.28
Poids de l'eau (psh-pss)	65	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	4682
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	8.28	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	2.04

2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	616	00	00
Poids du sol sec (pss)	546	08	01
Poids de l'eau (psh-pss)	60	12	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	12.82	16	03
		20	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	7	144.9	7.51
1	1.25	19	393.3	20.38
1 40	2	39	807.3	41.83
2	2.5	49	1014.3	52.55
4	5	102	2111.4	109.4
6	7.5	135	2794.5	144.79
8	10	158	3270.6	169.46
10	12.5	176	3643.2	188.77

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 74.14$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 102.18$ **Indice CBR = 102.18****Fig N° 24 : graphe du CBR à 4% en chaux avec 25coups.**

1-Etat initial de l'échantillon étudié (à 4% en chaux et 8.3% d'eau ; 10 coups)

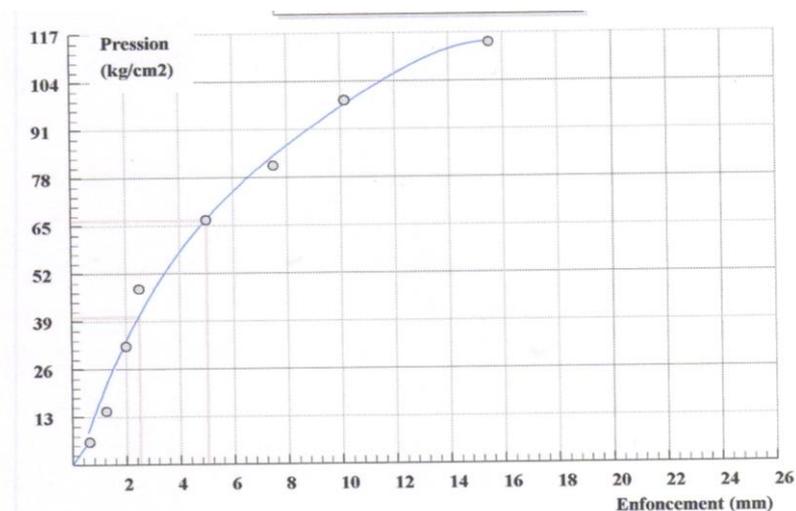
Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
Poids du sol humide (psh)	850	Poids du sol humide (psh)	4820
Poids du sol sec (pss)	785	Teneur en eau w(%)	8.28
Poids de l'eau (psh-pss)	65	Poids sec calculé $psc = (psh / [1+(w/100)])$	4451
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	8.28	Volume du moule (v)	2295
		Densité sèche (psc / v) 100	1.94

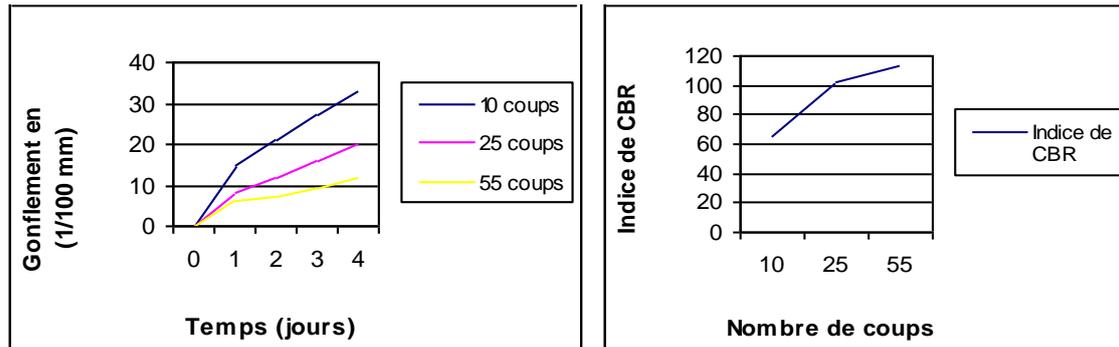
2-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après imbibition (%)		Gonflement en 1 / 100 mm	Temps (jours)
Poids du sol humide (psh)	894	00	00
Poids du sol sec (pss)	784	15	01
Poids de l'eau (psh-pss)	110	21	02
Teneur en eau moyenne [(psh-pss) / pss] 100 (%)	14.00	27	03
		33	04

Lecture initiale du cadran de la presse :30KN

Temps	Enfoncement	Force totale		Pression en KG/cm ²
		Lecture	Valeur	
30	0.625	6	124.2	6.44
1	1.25	14	289.8	15.02
1 40	2	31	641.7	33.25
2	2.5	46	952.2	49.34
4	5	64	1324.8	68.64
6	7.5	78	1614.6	83.66
8	10	95	1966.5	101.89
10	12.5	110	2277	117.98

Calcul de l'indice portantà 2.5mm : $P(2.5) / 0.70 = 59.32$ à 5mm : $P(5) / 1.05 = 65.31$ **Indice CBR = 65.31****Fig N°25 : graphe du CBR à 4% en chaux avec 10 coups.**



Les caractéristiques du stérile avant et après traitement :

Matériau non traité :

- Appartient au réseau principal 2 (RP2).
- Support à maximum 300 PL / j / sens.
- La portance c'est S_0 car leur CBR > 40 .
- La durée de vie est de 15 ans.
- A utiliser comme une couche de fondation.
- Les zones climatiques utilisables sont : I, II, et III.
- Le trafic cumulé (TC) maximum de PL sur la période considérée pour le dimensionnement (durée de vie)

$$TC_{\max} = 300 \times 365 \times [(1+0.04)^{15} - 1] / 0.04 = 2.19 \cdot 10^6$$

- TCE correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents à 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

$$TCE = TC_{\max} \times A = 2.19 \cdot 10^6 \times 0.6 = 1.31 \cdot 10^6$$

Matériau traité à 4 % en chaux :

- Appartient au réseau principal 1 (RP1).
- Support à maximum 6000 PL / j / sens.
- La durée de vie est de 20 ans.
- Les zones climatiques utilisables sont : I et II.
- $TC_{\max} = 6000 \times 365 \times [(1+0.04)^{15} - 1] / 0.04 = 6.52 \cdot 10^7$
- $TCE = TC_{\max} \times A = 6.52 \cdot 10^7 \times 0.6 = 39.12 \cdot 10^6$

Conclusion générale :

Un segment de la courbe granulométrique se trouve en dehors du fuseau de spécification.

Il est important de se porter une courbe, afin que la courbe soit à l'intérieur du fuseau suivant le tableau ci-dessous.

Ouverture de tamis (mm)	40	31.5	20	10	6.3	4	2	0.5	0.2	0.08
Tamisats cumulés (%)	100	90	65	42	30	20	17	14	13	13

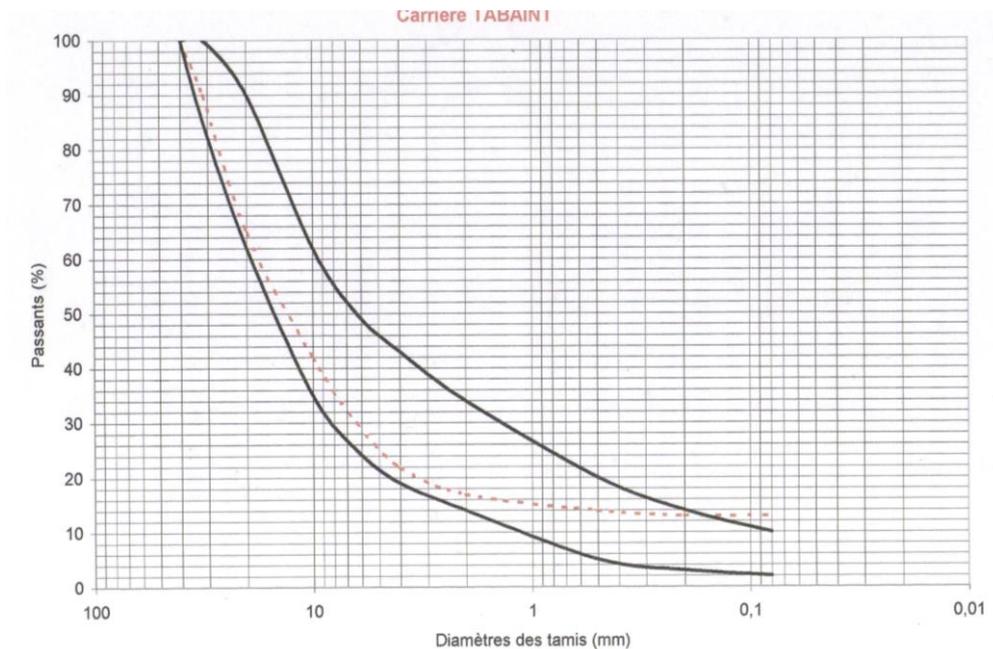


Fig N° 26: courbe granulométrique de la GNT corrigée.

Nous avons proposé de corriger la courbe par la modification du schéma de préparation mécanique existant, en introduisant un cycle de criblage préalable et un concassage secondaire, suivi d'une homogénéisation et d'un ajout de chaux à hauteur de 4 % (voir le schéma ci-dessous).

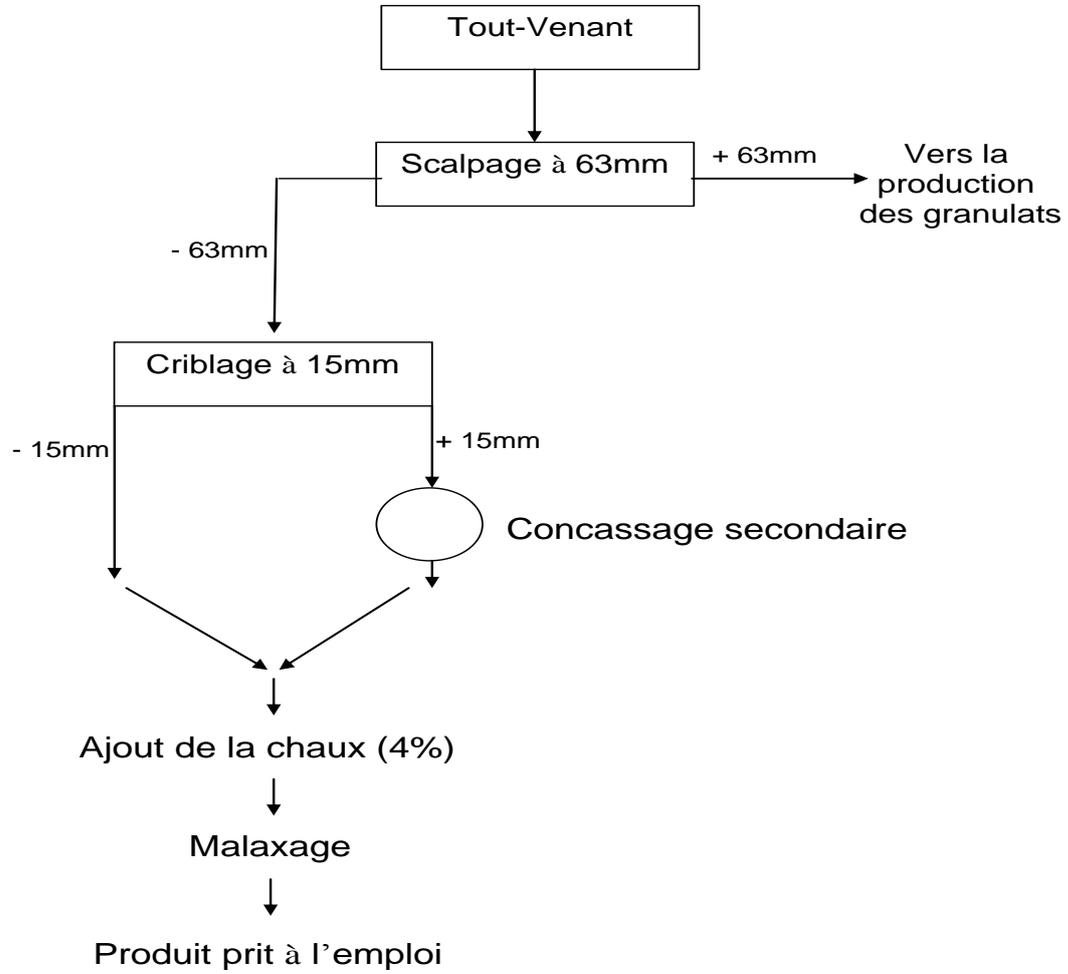


Fig N° 27 : schéma de traitement.

BIBLIOGRAPHIE

LES DOCUMENTS :

[1] R. DUPAIN – R. LANCHON – J. – C. SAINT – ARROMAN

Granulats, sols, ciments et bétons : caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire.

[2] Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves

Fascicule 1 et 2 (hypothèses et données de dimensionnement).

[3] Les rapports des stages (CTTP)

[4] Jean COAST et Guy SANGLERAT

Cours pratiques de mécanique des sols : 1. plasticité et calcul des tassements.

[5] SCALPAGES TRAITES

16 décembre 2004.

[6] Normalisation française P 18 – 560

[7] Normalisation française P 18 – 597

REFERENCES

- [1] note d'information N°38 de février 1998 du CETE Nord Picardie/SETRA CSTR- « Valorisation des produits de scalpage ».
- [2] **Abaque de Casagrande** : Cours pratique de mécanique des sols « 1. plasticité et calcul des tassements ». 3^{ème} édition. Page 43.
- [3] **Tab N° 4** : Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 49.
- [4] **Tab N° 5** : Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 50.
- [5] **Tab N° 6** : Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 18.
- [6] **Tab N° 7** : Normalisation française P 18 – 572 Décembre 1990.
- [7] **Tab N° 8** : Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 56.
- [8] **Tab N° 9** : Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 57.
- [9] **Tab N° 10**: Granulats, sols, ciments et bétons «caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire». 2^{ème} édition conforme aux normes européennes. Page 58.
- [10] **Tab N° 11** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 1». Novembre 2001. page 9.
- [11] **Tab N° 12** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2». Novembre 2001. page 16.
- [12] **Tab N° 13** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 1». Novembre 2001. page 11.
- [13] **Tab N° 14** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2». Novembre 2001. page 10.
- [14] **Tab N° 15** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2». Novembre 2001. page 10.
- [15] **Tab N° 16** : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2». Novembre 2001. page 13.

[16] Tab N° 17 : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2».

Novembre 2001. page 15.

[17] Tab N° 18 : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2».

Novembre 2001. page 17.

[18] Tab N° 19 : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves «Fascicule 2».

Novembre 2001. page 17.

[19] Spécification : Fiche technique matériaux et CPS « Octobre 1995».

ANNEXE

Classe B (suite)

SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES (suite)

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN REMBLAI →

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN COUCHE DE FORME →

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Sous-classe
D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	tamisat à 80 µm < 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2 ou ES ≤ 25	B _s Graviers argileux (peu argileux)	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Ils sont plus graveleux que les sols B _s et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification - séchage). Lorsqu'ils sont exploités dans la route, il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LHT nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, effort Micro Deval en présence d'eau, MDE).	IPI ≤ 7 ou w _n ≥ 1,25 w _{opt} 7 < IPI ≤ 15 ou 1,10 w _{opt} ≤ w _n < 1,25 w _{opt} 0,9 w _{opt} ≤ w _n < 1,10 w _{opt} 0,6 w _{opt} ≤ w _n < 0,9 w _{opt} w _n < 0,6 w _{opt}	B _s th B _s h B _s li B _s m B _s s B _s ls B _s bs	B _s th B _s th B _s h B _s h B _s m B _s s B _s ls B _s bs
B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS ≤ 1,5 ou Ip < 12	B _s Sables et graves très siliceux	La proportion des fines et la faible plasticité de ces dernières, rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A _s . Pour la même raison qu'indiquée à propos des sols A _s , il y a lieu de préférer le critère VBS au critère Ip, pour l'identification des sols B _s . Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LHT nécessite de connaître leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, effort Micro Deval en présence d'eau, MDE).	IPI ≤ 5 ou w _n ≥ 1,25 w _{opt} 5 < IPI ≤ 12 ou 1,10 w _{opt} ≤ w _n < 1,25 w _{opt} 12 < IPI ≤ 30 ou 0,9 w _{opt} ≤ w _n < 1,10 w _{opt} 0,6 w _{opt} ≤ w _n < 0,9 w _{opt} w _n < 0,6 w _{opt}	B _s th B _s h B _s m B _s s B _s ls B _s bs	B _s th B _s h B _s h B _s m B _s s B _s ls B _s bs
	tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ou Ip > 12	B _s Sables et graves argileux à très argileux	L'influence des fines est prépondérante ; le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant même plasticité que les fines du sol avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.	IPI ≤ 4 ou w _n ≥ 1,3 w _{opt} ou Ic ≤ 0,8 4 < IPI ≤ 10 ou 0,8 < Ic ≤ 1 ou 1,1 w _{opt} ≤ w _n < 1,3 w _{opt} 10 < IPI ≤ 25 ou 1 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 w _{opt} ≤ w _n < 1,1 w _{opt} 0,7 w _{opt} ≤ w _n < 0,9 w _{opt} ou 1,2 < Ic ≤ 1,3 w _n < 0,7 w _{opt} ou Ic > 1,3	B _s th B _s h B _s m B _s s B _s ls	B _s th B _s h B _s m B _s s B _s ls B _s bs

Annexe 3 :

Masse sec total $M_{s1} = 10000$ grs	Masse de l'échantillon sec après lavage sur le tamis 0.080mm : $M_{s2} = 8588$ grs
--------------------------------------	---

Ouverture de tamis(mm)	Masse refus cumulés R_i (g)	Refus cumulés $r_i = (100 * R_i / M_{s1})$ (%)	Tamisas cumulés $100 - r_i$ (%)	Tamisas cumulés (arrondi) (%)
50	597	5.97	94.03	94
40	1624	16.24	83.76	84
31.5	1909	19.09	80.91	81
25	2145	21.45	78.55	79
20	2511	25.11	74.89	75
16	3130	31.30	68.70	69
12.5	3775	37.75	62.25	62
10	4651	46.51	53.49	53
8	5330	53.30	46.70	47
6.3	5909	59.09	40.91	41
4	6739	67.39	32.61	33
2	7408	74.08	25.92	26
1.25	7813	78.13	21.87	22
0.63	8141	81.41	18.59	19
0.315	8368	83.68	16.32	16
0.16	8550	85.50	14.50	15
0.080	8588	85.88	14.12	14