
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira – Bejaia

Faculté de Technologie

Département Génie civil

Polycopié de Cours Géotechnique Routière

Master Génie Civil, Option Géotechnique

Etabli par : Dr. Ali BRARA

Maitre de conférences, Université de Bejaia.

Préface :

La géotechnique routière est l'application de la géotechnique au domaine routier, dans la quelle on étudie les caractéristiques des sols d'assise afin qu'ils puissent être le digne support de la structure de chaussée. Elle concerne les travaux de terrassement et les mouvements des terres où le sol est utilisé comme matériaux de construction en déblai/remblai, les soutènements et stabilisation de talus, les fondations des ouvrages d'art...etc.

Un projet géotechnique comporte plusieurs étapes comme la reconnaissance des sols, les diverses études préliminaires, la fixation des conditions de mise en place des matériaux, le contrôle qualité et la réception de la plate-forme sur chantier.

Ce cours s'adresse aux étudiants de première année Master en Génie civil, option géotechnique. Il est rédigé de manière à ce que l'attention du lecteur se concentre sur les spécifications géotechniques appliquées au domaine des infrastructures routières ainsi que le dimensionnement des chaussées routières et autoroutières. Les classifications des sols employés dans ce domaine précis ont pour objectif de ranger les sols support des plates formes par catégories présentant les mêmes caractéristiques géotechniques et qui répondent aux spécifications imposées par les règlements en vigueur.

Le présent polycopié est organisé en en Cinq chapitres selon le canevas de formation approuvé par la tutelle.

Le premier chapitre présente un aperçu sur de la classification des sols selon le guide de terrassements routiers (GTR), alors que le deuxième chapitre est consacré aux terrassements routiers qui constituent les travaux de préparation de l'infrastructure des routes et autoroutes, sous leurs diverses facettes, en partant des questions que pose l'élaboration des projets: la gestion des déblais et remblais, la caractérisation et la classification des terrains existants, les règles de réemploi des matériaux en remblai et en couche de forme le contrôle des travaux de terrassement selon le règlement en vigueur.

Le troisième chapitre, consacré au compactage des sols, les essais de compactage de laboratoire sont présentés ainsi que et les méthodes de contrôle du compactage des remblais exercées en chantier.

Le quatrième chapitre se posera sur la portance du sol support, les essais de plaque et CBR sont présentés. Quant au cinquième et dernier chapitre, il est dédié au dimensionnement des chaussées souples et rigides, la démarche de dimensionnement sera explicitée à travers les aspects liés à la conception et à la réalisation, on présente aussi dans les différents types de chaussées ainsi que les méthodes de dimensionnement.

Semestre: 1

Unité d'enseignement: UEM 1.1

Matière: Géotechnique routière

VHS: 45h (Cours : 1h30, TP: 1h30)

Crédits: 4

Coefficient: 2

Objectifs de l'enseignement:

Ce cours a pour objet de permettre à l'étudiant de mener une étude géotechnique appliquée au dimensionnement des chaussées routières et autoroutières

Connaissances préalables recommandées:

Mécanique des sols

Contenu de la matière:

Chapitre 1.	Classification des sols selon le GTR	(1 Semaine)
Chapitre 2.	Terrassements routiers	(2 Semaines)
Chapitre3.	Compactage des sols	(4 Semaines)
Chapitre 4.	Portance des sols	(4 Semaines)
Chapitre 5.	Dimensionnement des chaussées souples et rigides	(4 Semaines)

Mode d'évaluation:

Contrôle continu: 40%; Examen: 60%

Références bibliographiques:

1. *LCPC-SETRA. Guide des terrassements routiers : Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, France. Ed. IFSTTAR (ex. LCPC), France.*
2. *R. Coquand. Routes. Ed. Eyrolles.*
3. *P. Carillo. Conception d'un projet routier. Guide technique. Ed. Eyrolles.*

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre 1: Classification des sols selon le GTR

1.1 Introduction	1
1.2 Méthodologie d'une étude géotechnique routière.....	1
1.2.1 Règles et objectifs:.....	2
1.2.2 Les étapes :	2
1.3 Caractérisation des sols.....	2
1.4 Nécessité d'une classification spécifique pour les travaux routiers	3
1.5 Classification GTR	4
1.6 Paramètres retenus pour la classification des sols.....	6

Chapitre 2: Terrassements routiers

2.1 Introduction.....	16
2.2 Règles et objectifs :	17
2.3 Tracé géométrique:	17
2.4 Description générales /Terminologie:.....	17
2.5 Comportements des sols et emploi en remblai et couche de forme:	19
2.6 Exécution des terrassements:	19
2.7 Les contrôles	20
2.7.1 Les contrôles géométriques:.....	20
2.7.2 Les contrôles mécaniques:	20

Chapitre 3: Compactage des sols

3.1 Définitions – Généralités	21
3.2 Objectifs du compactage.....	21
3.3 Action du compactage	22
3.4 Les facteurs influençant le compactage.....	22
3.4.1 Influence de la teneur en eau	22
3.4.2 Influence de la nature du sol.....	24
3.4.3 Influence de l'énergie de compactage	24

3.5 Essais de compactage en laboratoire	25
3.6 Utilisation pratique des essais de compactage	28
3.7 Vérification du compactage in situ.....	29
3.7.1 Mesure de la masse volumique des matériaux d’assises en place – méthode au densitomètre à membrane - NF P 94-061-02 :	30
3.7.2 Mesure de la masse volumique des matériaux d’assises en place – mesure par gammadensimètre en transmission directe - NF P 98-241-1 :	30
3.8 Techniques et matériel de compactage	31

Chapitre 4: Portance des sols

4.1 Introduction	32
4.2 Les essais déterminant le comportement mécanique du sol sous le trafic.....	32
4.2.1 Essai de plaque E_v et M_E	32
4.2.2 Essai CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	34

Chapitre 5: Dimensionnement des chaussées souples et rigides

5.1 Introduction	37
5.2 Constitution et rôle d’une chaussée	37
5.2.1 La couche de forme.....	38
5.2.2 Les couches d’assises	38
- Couche de fondation :.....	38
- Couche de base :	39
5.2.3 La couches de surface	39
5.3 Les différents types de chaussée.....	39
5.3.1 Les chaussées souples	39
5.3.2 Les chaussées semi –rigides	40
5.3.3 Les chaussées rigides	40
5.4 Méthodes de dimensionnement des structures de chaussée	41
5.4.1 Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio).....	41
5.4.2 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves ‘CTTP’	42
5.4.3 Méthode du catalogue des structures types de chaussées neuves ‘SETRA’	43

Liste des figures

Figure 1.1 : Description d'un sol - les différentes phases et états de saturation	3
Figure 1.2 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature.....	5
Figure 1.3 : Classification française des sols rocheux et organiques :	6
Figure 1.4 : Courbe granulométrique	7
Figure 1.5 : États de consistance des sols	9
Figure 1.6 : Limites d'Atterberg	9
Figure 1.7 : Type de sol en fonction de la valeur « VBS ».....	11
Figure 1.8 : Essai d'équivalent de sable	12
Figure 1.9 : Machine Los Angeles	13
Figure 1.10 : Machine Micro Deval	13
Figure 2. 1 : Les différentes parties constituant la route	18
Figure 3.1 : Objectifs du compactage.....	22
Figure 3.2 : Courbe de compactage.....	23
Figure 3.3 : Influence de la teneur en eau sur la courbe de compactage	24
Figure 3.4 : Influence de l'énergie de compactage sur la courbe de compactage.....	24
Figure 3.5 : Courbe de l'essai proctor	26
Figure 3.6 : Diagramme Proctor et courbe de saturation.....	26
Figure 3.5 : Le compactage dans la pratique	28
Figure 3.6 : Courbe d'étalonnage	29
Figure 3.7 : Densitomètre à membrane.....	30
Figure 3.8 : Gammadensimètre	31
Figure 4.1 : Essai de plaque	33
Figure 4.2 : Schéma de l'essai CBR.....	35
Figure 4.3 : Courbe de l'essai CBR.....	35
Figure 5.1 : Les différentes couches d'une chaussée	38
Figure 5.2 : Les différents types d'une chaussée	40
Figure 5.3 : Démarche du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP)	43

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Expression des résultats pour GTR.....	5
Tableau 3.1 : Comparaison entre l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié.....	27
Tableau 4.1 : Classification de la portance des sols selon GTR.....	36
Tableau 5.1 : Coefficients d'équivalence pour chaque matériau.....	42
Tableau 5.2 : Classes du trafic poids lourd.....	44
Tableau 5.3 : Classes du sol en fonction de CBR (SETRA).....	44

Chapitre 1: Classification des sols selon le G.T.R

1.1 Introduction

Le domaine des terrassements et des routes est économiquement très important notamment dans les travaux publics. Les travaux de terrassement s'appliquent aux infrastructures linéaire (routes, autoroutes, voies ferrées) mais aussi aux autres assises telles que les plates-formes aéroportuaires ; plates-formes industrielles ... etc).

Le projet de terrassements doit faire l'objet d'un dossier d'étude géotechnique, ce dossier doit permettre d'identifier et de classer tous les sols rencontrés lors des sondages exécutés dans les zones à déblayer et dans les assises de remblai.

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier, elle concerne :

- Les travaux de terrassement proprement dits (utilisation du sol comme matériaux de construction en déblai/remblai)
- Les soutènements et stabilisation de talus
- Les fondations des ouvrages d'art

Un projet géotechnique se déroule de la façon suivante :

- Les reconnaissances géotechniques
- La reconnaissance des sols
- Les diverses études
- La fixation des conditions de mise en place des matériaux
- Le contrôle qualité et la réception de la plate-forme sur chantier

1.2 Méthodologie d'une étude géotechnique routière

En géotechnique routière, la méthodologie utilisée s'apparente à la démarche employée pour les routes.

Elle se décompose en 3 phases principales décrites dans le guide Technique du LCPC.

- Phase 0: les études préliminaires: → Mettre en évidence les éventuels points sensibles (points durs)
- Phase 1: les études d'avant Projet: → Chiffrer / Pré-dimensionner (précèdent l'enquête d'utilité publique)
- Phase 2: les études de projet: → Dimensionner / Écrire les pièces du marché

1.2.1 Règles et objectifs:

Utiliser et s'adapter aux matériaux du chantier ou d'une zone extérieure la plus proche possible appelée Zone d'Emprunt.

Utilisation de règles de référence à partir desquelles l'ingénieur doit en apprécier les adaptations en fonction de son expérience (pas de calcul mathématique).

Adapter le terrain naturel au profil en long du projet et proposer une portance suffisante pour permettre la réalisation des couches de chaussées et supporter le trafic.

Déblais, remblais, drainage, talus, décapage.

1.2.2 Les étapes :

- Classification spécifique des Sols
- Définition des modalités de Mise en Œuvre propre à chaque classe de sol
- Détermination du Compactage
- Procédures et Techniques de Contrôle

1.3 Caractérisation des sols

La connaissance du sol et de ses caractéristiques géotechniques et morphologiques, est une étape primordiale dans le choix d'une structure de chaussée. En effet, la connaissance du sol, associée à une bonne approche du trafic supporté et des matériaux de chaussée utilisés, permet d'optimiser les épaisseurs des couches de chaussées.

Pour le cas d'un projet routier, la classification des sols aura deux principaux objectifs :

- Approcher la portance du sol support afin de dimensionner les corps de chaussée.
- Estimer la possibilité de l'utilisation du sol en remblai ou en couche de forme.

Un sol est le produit de décomposition mécanique ou physico-chimique de roches. C'est le mélange d'une fraction granulaire plus ou moins importante et d'une fraction argileuse plus ou moins importante.

Les sols sont constitués de trois phases différentes:

- Une phase liquide (l'eau)

- Une phase gazeuse (l'air)
- Une phase solide (les grains): elle est composée de particules issues de décomposition physique et chimique de roches mères. Les grains peuvent être de taille très fine ou être recristallisés. L'assemblage des différentes tailles de grains déterminera pour partie le comportement du sol.

Ce sol se déforme par glissement des particules qui le composent. Il résiste par frottement et/ou par attraction inter-particulaire (c'est la cohésion).

Le squelette solide est l'élément essentiel. Il influe de façon considérable sur le comportement des sols et notamment les sols à forte proportion granulaire. La nature des grains est également à considérer.

La proportion d'eau est importante à considérer notamment dans le comportement des sols fins

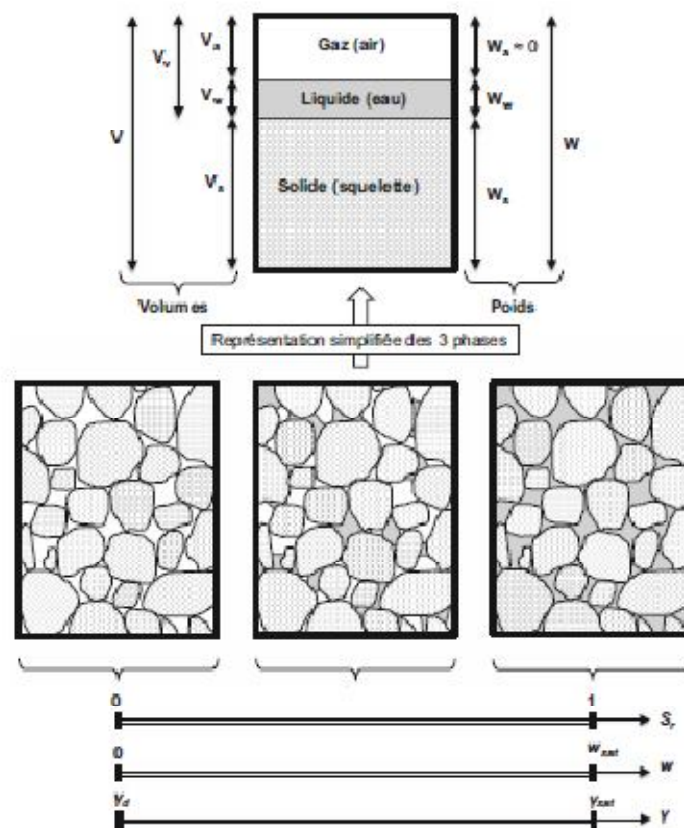


Figure 1.1 : Description d'un sol - les différentes phases et états de saturation

1.4 Nécessité d'une classification spécifique pour les travaux routiers

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à sont confrontés à la complexité des comportements des sols fait que les propriétés qui sont significatives pour un certain usage ne sont souvent plus les mêmes dès

que l'on s'intéresse à un autre usage. Ceci conduit alors à rechercher des classifications spécifiques à chaque grand domaine d'utilisation de ces matériaux.

Voilà pourquoi est nécessaire une classification des sols établie pour les Terrassements Routiers, précisément en fonction des problèmes posés par leur utilisation dans la construction des remblais et des couches de forme, et s'appuyant sur les paramètres d'identification et de comportement jugés les plus représentatifs à cet égard.

1.5 Classification GTR

L'utilisation des terres en remblai, en technique routière, est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place.

Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme) propose une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Ils permettent de définir la classe du matériau sur la base de paramètres tirés à partir des résultats de plusieurs types d'essais.

La classification GTR est une classification présentant un réel intérêt pratique et utilisé dans les travaux de terrassement.

La norme NF P 11-300 "Classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières" permet de classer les sols (voir Tableau 1), en fonction d'un certain nombre de paramètres, en plusieurs classes :

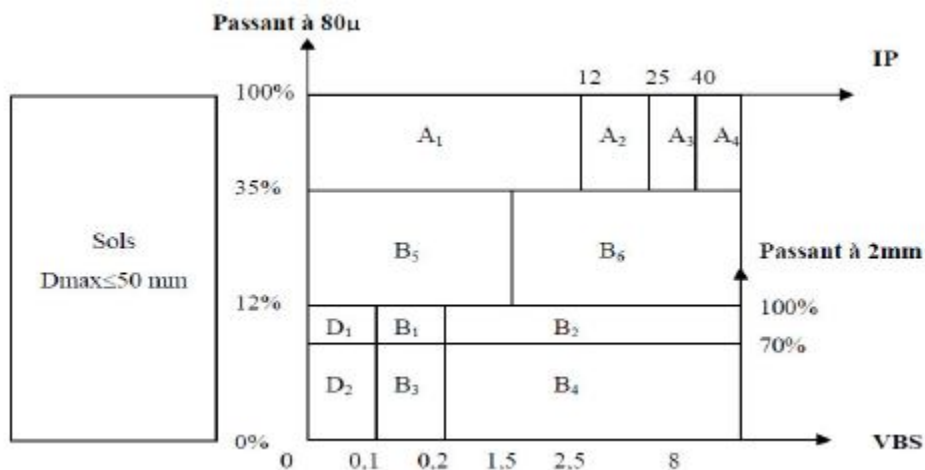
- Classe A - Sols fins
- Classe B - Sols sableux et graveleux avec fines
- Classe C - Sols comportant des fines et des gros éléments
- Classe D - Sols insensibles à l'eau

Tableau 1.1 : Classification GTR des matériaux routiers

Classification GTR

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

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

Figure 1.2: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant la norme NF P 11-300 (Classification française des sols de $D_{\max} > 50 \text{ mm}$)

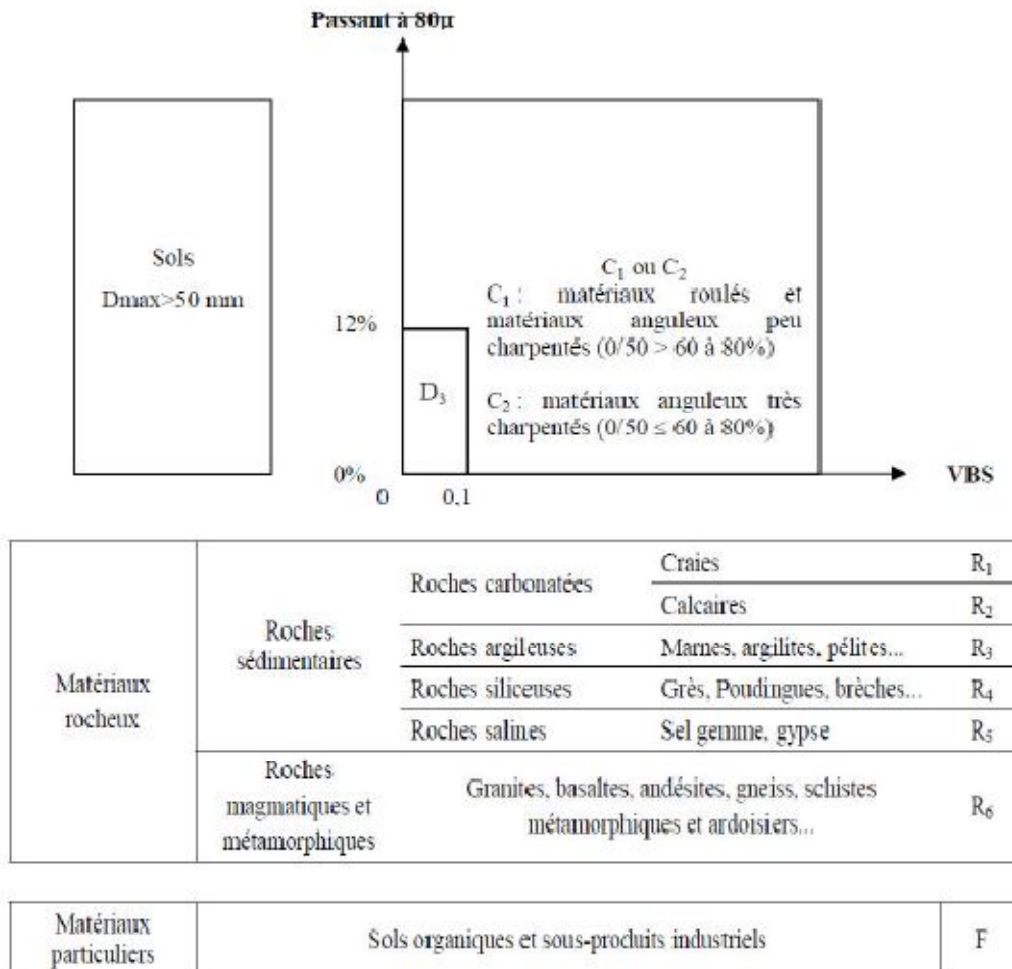


Figure 1.3 : Classification des sols rocheux et organiques

1.6 Paramètres retenus pour la classification des sols

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories :

- paramètres de nature;
- paramètres de comportement mécanique,
- paramètre d'état.

Ils sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

1.6.1 Paramètres de nature

Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité.

- La granularité (normes P 94-056 et 057)

Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Cette opération permet de déterminer le pourcentage d'éléments fins (passant à 80µm) qui caractérise la sensibilité à l'eau du matériau d'une part et d'examiner, d'autre part, la forme de la courbe granulométrique : représentation graphique de la distribution des grains suivant leurs dimensions

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisâts sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

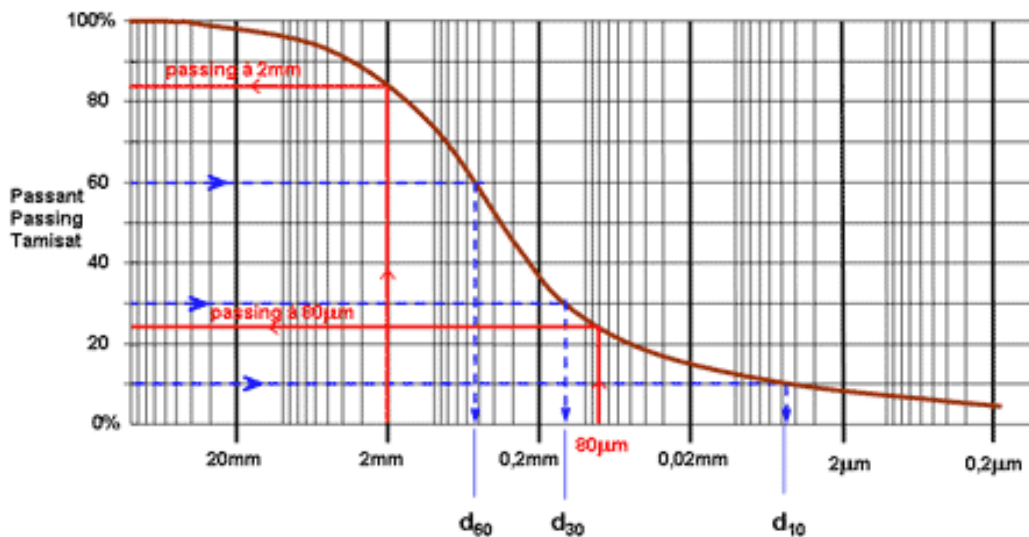


Figure 1.4 : Courbe granulométrique

La forme de la courbe granulométrique est aussi extrêmement importante, elle est caractérisée par deux coefficients qui sont le coefficient d'uniformité C_u (dit de Hazen) et le coefficient de courbure C_c . Ils servent à la description de la granulométrie et sont fonction de d_x (d_{10} , d_{30} , d_{60}) qui est par définition le diamètre du tamis dont le tamisât cumulé est égal à x % (10%, 30%, 60%).

Coefficient d'uniformité C_u :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Coefficient de courbure C_c :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

On considère que lorsque C_u est supérieur à 4 pour les graviers, et supérieur à 6 pour les sables, alors un coefficient C_c entre 1 et 3 ($1 < C_c < 3$) donne une granulométrie bien étalée (faible porosité).

Pour ce qui est de la courbe granulométrique des éléments fins, on emploie l'analyse granulométrique par voie humide, la méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.

Le diamètre équivalent D d'une particule à une profondeur connue, après un certain intervalle de temps à partir du commencement de la sédimentation est donné par:

$$D = 0.005531 \sqrt{\frac{\mu \cdot H}{(G_s - 1) \cdot t}}$$

μ : viscosité de l'eau

H : hauteur effective en mm

G_s : gravité spécifique de la particule

t : temps écoulé en minutes.

Dmax : Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

On propose 50 mm comme valeur proposée (seuil retenu) pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux des sols blocailleux

tamisé à 80 μm : ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d'évaluer leur sensibilité à l'eau.

On retient :

- **35 %** : c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine ($< 80 \mu\text{m}$),

- **12 %** : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

tamisé à 2 mm : ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

On retient :

- **70 %** : au-delà de 70 % on définit les sols à tendance sableuse et en-deçà les sols à tendance graveleuse.

- L'argilosité

a- Limites d'Atterberg :

Caractériser l'argilosité d'un sol, et donc déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les « Limites d'Atterberg » :

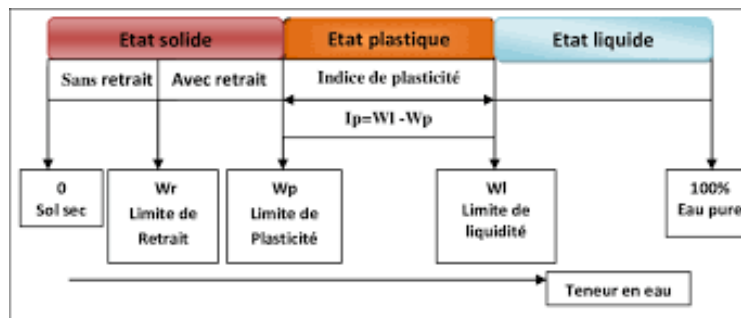


Figure 1.5 : États de consistance des sols

- Limite de Liquidité : W_L (frontière entre état plastique et l'état liquide)
- Limite de Plasticité : W_P (frontière entre état solide et l'état plastique)

La consistance d'un sol fin peut être modifiée en faisant varier sa teneur en eau. Par séchage progressif, les argiles et limons passent de l'état liquide à plastique puis à l'état solide. Les limites d'Atterberg de liquidité W_L et de plasticité W_p , déterminées expérimentalement, permettent de séparer ces trois états.

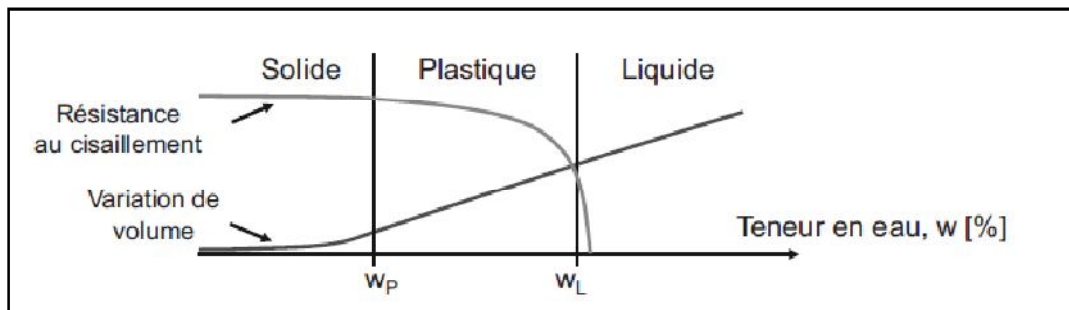


Figure 1.6 : Limites d'Atterberg

– Cet essai s'applique généralement sur les sols comportant un pourcentage de fines ($80\mu\text{m}$) supérieur à 35%.

– La détermination de l'argilosité d'un sol par les limites d'Atterberg que par l'essai VBS (Valeur de Bleu du Sol) est à privilégier dès que le sol est argileux à très argileux.

L'essai s'effectue sur la fraction $0/400\ \mu\text{m}$ en deux phases :

– Détermination de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure pratiquée dans une coupelle se ferme à 10 mm, suite à 25 chocs répétés (cette limite de liquidité correspond à une résistance à un cisaillement conventionnel).

– Détermination de la teneur en eau WP pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3 mm se fissure (cette limite de plasticité correspond à une résistance à la traction conventionnelle).

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de consistance qui caractérise l'état hydrique d'un sol (80 à 90 % d'éléments < 400µm) :

$$IP = WL - WP$$

$$I_c = \frac{W_L - W_n}{I_p}$$

avec:

Wn : teneur en eau naturelle de la fraction 0/400µm

L'indice de plasticité Ip (norme P 94-051) :

Seuils retenus :

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

b- Valeur de Bleu du Sol (VBS) :

Déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient.

Cet essai concerne les sols et certains matériaux rocheux. Toutefois, pour les matériaux les plus argileux, on privilégiera la réalisation des limites d'Atterberg.

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2 mm des sables courants ou sur les fillers (0 / 0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant. Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

On appelle valeur de bleu VB d'un sable (MB dans la norme européenne), la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm du sable.

On appelle valeur de bleu des fillers VBF la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0 / 0,125 mm d'un granulat (fillers, sable fillerisé, tout venant gravillon).

On appelle valeur de bleu sols VBS la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50mm d'un sol. Pour cet essai on travaille sur la fraction 0/5 du matériau.

Une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par

l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

La VBS nous est donnée par formule : $VBS = B \cdot C \cdot 100 / Ms$ (en grammes de bleu pour 100g de matériau sec)

B : masse de bleu introduite (solution à 10g/l).

C : proportion du 0/5 mm (soumis à l'essai) dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

Ms : masse sèche de la prise d'essai.



Figure 1.7 : Type de sol en fonction de la valeur « VBS »

La valeur de bleu de méthylène (VBS) :

Seuils retenus :

- **0,1** : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau (au sens défini précédemment). Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80 μm qui doit être $\leq 12\%$.
- **0,2** : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr 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** : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- **8** : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

c- Équivalent de Sable (ES) :

L'essai équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Et surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton. Car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

L'essai équivalent de sable s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5mm ; il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus

dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (argileux par exemple).

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

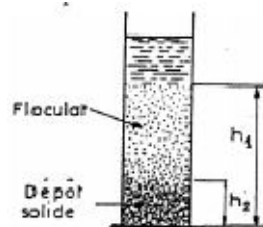


Figure 1.8: Essai d'équivalent de sable

1.6.2 Paramètres de comportement mécanique

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : **les coefficients Los Angeles (LA)** (norme P 18-573) et **Micro-Deval en présence d'eau (MDE)** (norme P 18-572), mesurés sur la fraction granulaire 10/14 (ou à défaut sur la fraction 6,3/10) et **le coefficient de friabilité des sables (FS)** mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm (norme P 18-576).

- **Essai Los Angeles**

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance aux chocs.

Il consiste à mesurer la quantité des éléments fins produits en soumettant le granulat aux chocs de boules normalisés dans une machine dite « Los Angeles » qui est un broyeur de laboratoire.

Tamisée sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, lavée, séchée et pesée (à 1 g près), la prise d'essai (5000 +/- 5 g) est placée dans un tambour avec une charge de boulets appropriée. Entraînés durant 500 tours par tablette en acier, ces boulets retombent avec le matériau qu'ils fragmentent. Ce dernier est ensuite lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le passant est pesé (masse m).

Le coefficient Los Angeles est le rapport entre la masse du refus et la masse initiale

$$\frac{LA}{100} = \frac{m}{500}$$

Les seuils retenus diffèrent selon les utilisations des sols. Au-delà de 45, le sol ne peut pas être utilisé en couche de forme.

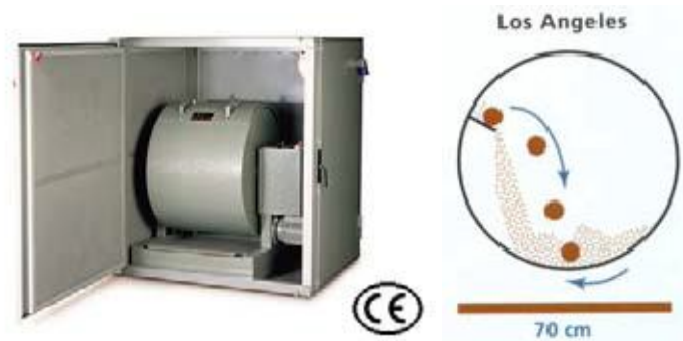


Figure 1.9: Machine Los Angeles

- **Essai Micro-Deval**

L'objectif de cet essai est d'apprécier la résistance à l'usure des granulats ; l'essai est réalisé en présence d'eau pour se rapprocher des conditions réelles de séjour des granulats dans les chaussées.

Il consiste à mesurer dans des conditions bien définies l'usure des granulats par frottements réciproques dans un cylindre en rotation. L'usure est mesurée par la quantité de fines produites.

Cas d'un gravillon compris entre 4 et 14 mm :

Lavé, séché et pesé (à 1 g près), la prise d'essai (500 +/- 2 g) est introduite dans un cylindre normalisé avec une charge de billes d'acier (2000, 4000 ou 5000 g selon la granularité), et 2.5 litres d'eau. Après 12000 rotations (2 heures), le matériau est lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et le refus est pesé (masse m').

Le coefficient Micro Deval est le rapport en % entre la masse finale de refus et la masse initiale

$$\frac{MDE}{100} = \frac{500 - m'}{500}$$

Le seuil est également différent selon l'utilisation voulue du matériau, et au-delà de 45, le sol ne peut pas être utilisé en couche de forme.



Figure 1.10: Machine Micro Deval

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme (résistance au trafic, fragmentation).

On peut évoquer aussi Des essais caractérisent le comportement vis à vis des agressions physico-chimiques. Il s'agit d'essai d'altérabilité.

Seuils retenus :

- 45 pour les valeurs LA et MDE
- 60 pour les valeurs FS.

16.3 Paramètres d'état

Ils sont appelés paramètres d'états car il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme. Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Cinq états hydriques sont distingués dans la présente classification :

- *L'état "très humide" (th)* : c'est un état d'humidité très élevé ne permettant plus en général la réutilisation du sol.
- *L'état "humide" (h)* : c'est un état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur...).
- *L'état d'humidité "moyen" (m)* : c'est l'état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre).
- *L'état "sec" (s)* : c'est un état d'humidité faible mais autorisant encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, surcompactage...).
- *L'état très sec (ts)* : c'est un état d'humidité très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol.

- Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique :

La présente classification a retenu pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- La position de la teneur en eau naturelle (W_n) de la fraction 0/20 du matériau par rapport à l'optimum Proctor normal (W_{OPN}) exprimée par le rapport. Ce rapport est le paramètre d'état le plus fiable pour caractériser les états (s) et (ts) car les difficultés d'obtention de la

compacité requise en dépendent directement. Sa signification est en revanche moins claire pour distinguer les états (h) et (th), (norme P 94-093).

- La position de la teneur en eau naturelle (W_n) par rapport aux limites d'Atterberg (W_L et I_p) qui s'exprime par l'Indice de consistance (I_c), (norme P 94-051).

L' I_c permet de caractériser correctement les cinq états (th), (h), (m), (s) et (ts) mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments $\leq 400 \mu\text{m}$.

L'indice portant immédiat (IPI) : qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle (norme P 94-078).

L'IPI est en général le paramètre à privilégier pour caractériser les états (h) et (th) car il traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. En revanche, il perd sa signification dans les états (s) et (ts).

Chapitre 2 : Terrassements routiers

2.1 Introduction

Le projet de terrassements doit faire l'objet d'un dossier d'étude géotechnique, ce dossier doit permettre d'identifier et de classer tous les sols rencontrés lors des sondages exécutés dans les zones à déblayer et dans les assises de remblai.

L'action de terrasser consiste à manipuler des sols et à les utiliser comme matériaux routiers. Autrement dit, c'est extraire, transporter, et mettre en dépôt ou en remblai.

Du point de vue géométrique, l'exécution des terrassements consiste en la remplacer la ligne du terrain naturel par la ligne du projet, et ce sur le dossier contenant les pièces géométriques de l'étude du tracé routier.

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier, dans el s'inscrit l'opération de terrassement routier qui est primordiale, elle concerne :

- Les travaux de terrassement proprement dits (utilisation du sol comme matériaux de construction en déblai/remblai)
- Les soutènements et stabilisation de talus
- Les fondations des ouvrages d'art

Un projet de terrassement se déroule de la façon suivante :

- Les reconnaissances géotechniques
- La reconnaissance des sols
- Les diverses études
- La fixation des conditions de mise en place des matériaux
- Le contrôle qualité et la réception de la plate-forme sur chantier

2.2 Règles et objectifs :

Utiliser et s'adapter aux matériaux du chantier ou d'une zone extérieure la plus proche possible appelée Zone d'Emprunt.

Utilisation de règles de référence à partir desquelles l'ingénieur doit en apprécier les adaptations en fonction de son expérience (pas de calcul mathématique).

Adapter le terrain naturel au profil en long du projet et proposer une portance suffisante pour permettre la réalisation des couches de chaussées et accepter le trafic.

Déblais, remblais, drainage, talus, décapage.

2.3 Tracé géométrique:

La route est définie géométriquement par son axe en plan, son profil en long et son profil en travers

Tracé en plan : est la projection de la route sur un plan horizontal ; Le tracé d'une route est une succession de droites et de courbes ; Les alignements droits sont raccordés par des arcs de cercles, des clotoïdes , courbes composées : courbe en s, courbe en ove...

Profil en long : est le développement de l'intersection de la route avec un cylindre à génératrice verticale passant par l'axe de la route (chaussée), il est composé de droites raccordées par des paraboles à axe vertical.

Profil en travers : coupe suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la route.

Remarque : la difficulté est de faire le lien entre les différents plans, on ne peut pas réaliser le tracé sur la vue en plan sans faire le lien avec le profil en long et les profils en travers.

2.4 Description générales /Terminologie:

Les différentes parties de la route (figure 1.1):

Le terrain naturel : avant tout travaux, ou préparé après exécution des terrassements.

L'emprise : est la surface du terrain appartenant à la collectivité et affectée à la route ainsi que ses dépendances.

L'assiette : (de la route) : est la surface du terrain réellement occupée par la route. Elle est limitée par l'intersection des terrains naturels des talus des remblais et des déblais et des remblais et de la surface extérieure des ouvrages indispensables à la route.

La plateforme : est la surface de la route qui comprend la ou les chaussée(s), les accotements et éventuellement les terre-pleins.

Pratiquement, on distingue les deux cas suivants :

- **En remblai :**

S'il n'y a pas de banquettes, de barrières de sécurité ni de parapet, la plateforme s'étend jusqu'à la crête du remblai.

S'il y'a une banquette, une barrière de sécurité ou un parapet, la plateforme s'étend jusqu'à la limite entre l'accotement et la banquette ou les glissières de sécurité ou le parapet

– En déblai :

S'il ya un fossé, la plateforme s'étend jusqu'à la crête (coté chaussée du fossé)

S'il n'y a pas de fossé, elle s'étend jusqu'au pied de talus

Dans les zones construites, si les maisons bordent la route, en s'avancant jusqu'à l'accotement, la plateforme s'étend jusqu'à la limite entre l'accotement et la façade des maisons.

La chaussée:

au sens géométrique du terme, c'est la surface aménagée de la route sur laquelle circulent normalement les véhicules.

Elle ne comprend pas les bandes de guidage qui la limitent éventuellement.

La route peut être soit à chaussée unique soit à chaussées séparées.

Les chaussées séparées peuvent être construites sur la même plateforme ou sur des plateformes distinctes, dans le premier cas, les chaussées sont séparées par des bandes de terrains appelées « terre-pleins ».

Une chaussée est dite à n voies lorsqu'elle est aménagée pour permettre le passage de n véhicules dans le même profil en travers.

Les accessoires : accotements, garage, zones de stationnement, en plus de territoires et des bordures

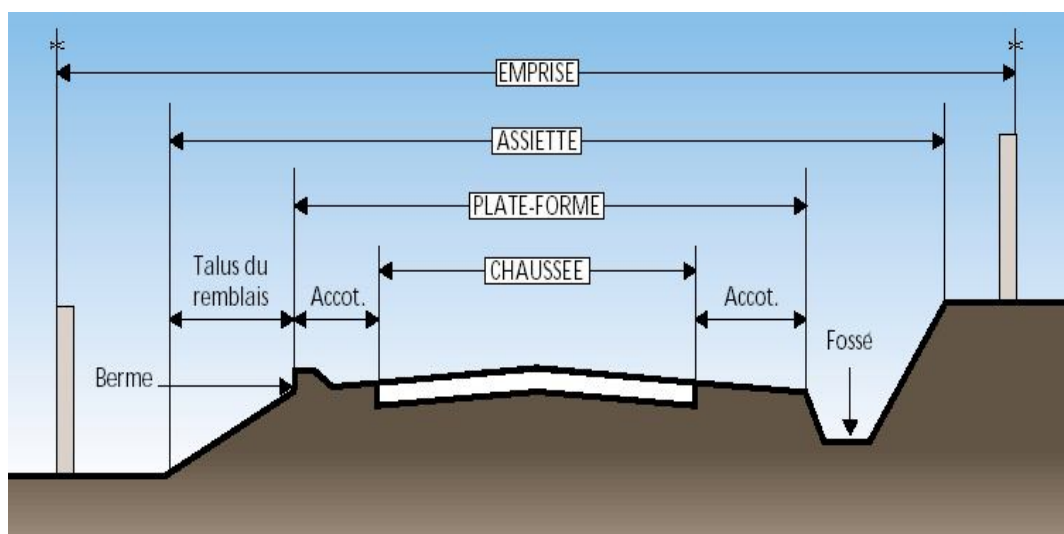


Figure 2.1: Les différentes parties constituant la route

2.5 Comportements des sols et emploi en remblai et couche de forme:

Les aspects à considérer systématiquement pour étudier les capacités de réemploi des sols sont les suivants:

- Aptitude à la densification
- Aptitude à supporter la circulation (caractéristique importante en phase de chantier)
- Aptitude au traitement à la chaux ou au ciment
- Caractère évolutif

2.6 Exécution des terrassements:

Pour déterminer une structure de chaussée, il existe un catalogue type en fonction de la catégorie de route VRS (voies du réseau structurant) ou VRNS (voies du réseau non structurant).

Pour entrer dans ce catalogue nous avons besoin de deux données :

- Le trafic (T)
- La catégorie de plate forme (PF)

Le terrassement tiendra compte de la portance du sol qui varie suivant la position de la route.

Le terrassier livrera une partie supérieure de terrassement (PST) en fonction de la plate forme (PF) désirée. Il doit suivant le sol rencontré en déblai, ajouté une couche de forme d'épaisseur variable suivant les différentes zones.

Il est plus facile de faire varier cette couche de forme plutôt que de modifier l'épaisseur de la structure de chaussée.

L'opération de terrassement comporte la préparation et le nivellement du terrain ainsi que l'exécution des fouilles pour les fondations.

Bien que des sondages préalables soient le plus souvent exécutés, les travaux de terrassement réservent souvent des surprises: la nature des terrains n'est pas celle qu'on l'attendait, le bon sol ne se trouve pas à la cote prévue, il faut faire face à des venues d'eau non prévisibles.

L'exécution des terrassements est l'ensemble des mouvements appliqués au sol pour modifier sa surface naturelle afin de le rendre apte à l'implantation d'un projet (nivellements, talutages, découpages, tranchées, excavations, fouilles...)

Décapage : c'est un terrassement de très faible profondeur (environ 20 cm) et de grande surface. L'opération de décapage se fait en général, pour se débarrasser de la terre végétale.

Déblais : c'est l'opération qui consiste à abaisser le niveau du terrain par un enlèvement des terres. (Ce mot est aussi employé pour désigner la terre provenant de l'extraction)

Remblais : c'est l'opération qui consiste à mettre en place une certaine quantité de terre pour combler des cavités ou établir sur la surface du sol un massif de terre.

Remarque : l'art du terrassement consiste à chaque fois que c'est possible à assurer un équilibre entre déblais et remblais.

2.7 Les contrôles

Les contrôles réalisés sur un chantier de terrassement sont de plusieurs natures:

2.7.1 Les contrôles géométriques:

C'est la vérification que l'ouvrage exécuté est conforme aux prescriptions du maître d'ouvrage. Ce point est important, car tant les côtes altimétriques que de tracé ont été déterminées, comme nous l'avons vu dans le chapitre des études, pour prendre en compte des contraintes fortes.

2.7.2 Les contrôles mécaniques:

Il y a lieu de vérifier que la plate-forme livrée, ainsi que la couche de forme présentent des performances mécaniques conformes au cahier des charges et surtout aux hypothèses qui ont été prises pour le calcul de la chaussée à supporter. Les contrôles sont réalisés par le maître d'œuvre. Il s'agit essentiellement de mesures de déflexion, et de portance.

On parle souvent de rapport $EV2 / EV1 < 2$ et de déflexion.

Chapitre 3 : Compactage des sols

3.1 Définitions – Généralités

Le compactage se définit comme un procédé permettant d'augmenter la densité et la capacité de charge d'un matériau grâce à l'application de forces extérieures statiques ou dynamiques. Cette augmentation de densité du matériau passe par la diminution de son volume à travers la réduction du volume des vides entre les grains. Cette action augmente la compacité du sol en resserrant sa texture, elle réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa portance par l'application d'un procédé mécanique.

Dans les domaines de la construction, la stabilité d'un sol et son aptitude à supporter les charges, dépendent de la qualité du compactage auquel il est soumis. Il est important de bien réaliser que la diminution de volume due au compactage ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol initial.

Si un compactage est mal exécuté ou impropre, des affaissements ou autres défauts sont à craindre, avec pour conséquences des travaux de rénovation et/ou d'entretien très importants.

3.2 Objectifs du compactage

Les objectifs principaux sont poursuivis lors de la réalisation des travaux de terrassements routiers, des couches de forme, d'assises de chaussées et des couches de roulement sont :

- Augmenter les caractéristiques mécaniques
- Augmenter la portance et la traficabilité des couches de forme ou de remblai.
- Augmenter le module des assises non traitées
- Augmenter la résistance des assises traitées et des couches de roulement
- Permettre aux matériaux de résister au trafic routier
- Assurer l'imperméabilité

Le compactage est la première des protections contre l'agression de l'eau, objectif important pour la couche de roulement, et évite les désordres sur les couches inférieures.

Il permet de supprimer les déformations ultérieures : tassements du remblai, tassements différentiels, déformations des chaussées, orniérage de couche de surface

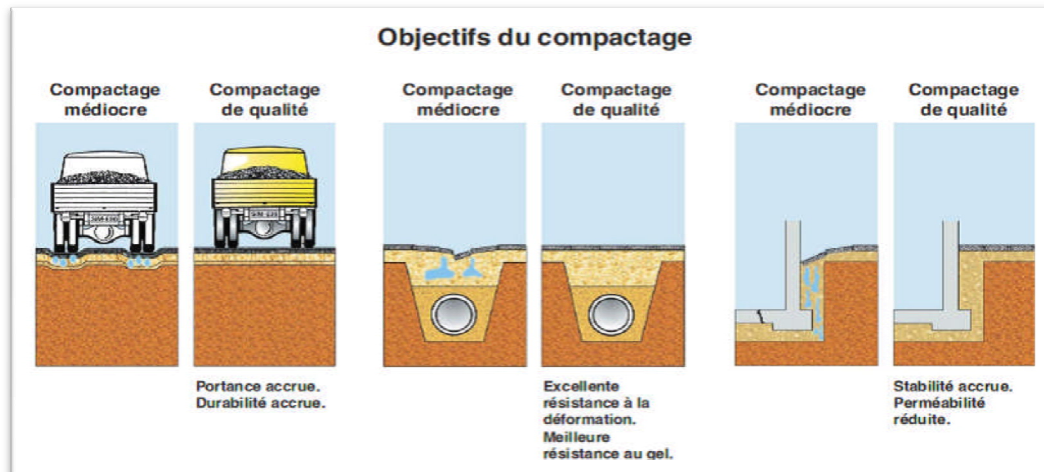


Figure 3.1 : Objectifs du compactage

3.3 Action du compactage

Les sols et les matériaux routiers sont constitués de:

- solides (grains de sol, granulats, sable....)
- liquide (eau, bitume, émulsion....)
- air (emprisonné entre solides et liquides)

L'action du compactage se traduit par

- un rapprochement des grains du sol entre eux (tassement)
- une expulsion d'air

3.4 Les facteurs influençant le compactage

Le compactage est influencé par les facteurs suivants :

- la teneur en eau ;
- la nature du sol ;
- l'énergie de compactage.

3.4.1 Influence de la teneur en eau

Si un sol est compacté par une série de n chocs que lui impriment les chutes libres d'une masse, la déformation du sol ou la diminution de son volume absorbe une énergie égale à n fois l'énergie potentielle de la masse avant la chute ($E = mgh$ pour une masse m tombant d'une hauteur h), cette énergie s'appelle l'énergie de compactage.

Si on porte en graphique les γ_d obtenus suite à une série d'essais de compactage d'un échantillon de sol, chacune correspond à une teneur en eau différente mais en mettant toujours en œuvre la même énergie de compactage, on obtient la courbe de compactage:

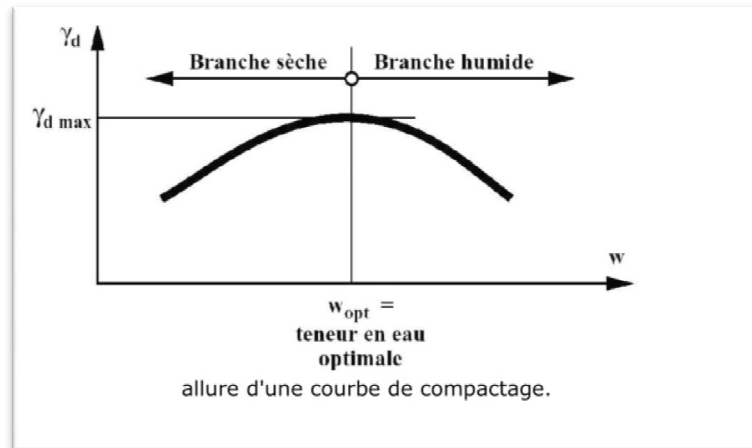


Figure 3.2 : Courbe de compactage

Il s'agit de la courbe de compactage correspondante à une énergie de compactage donnée (si l'on fait varier l'énergie de compactage, on obtient une courbe différente).

La courbe de compactage a l'allure d'une cloche, elle est caractérisée par l'optimum Proctor où γ_{dmax} correspond à une teneur en eau optimale (w_{opt}).

Le fait que la courbe se présente sous forme d'une cloche s'explique de la façon suivante :

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profit.

Par contre, l'eau joue un rôle de lubrifiant dans le processus de compactage (un sol trop sec est le siège de frottements importants entre les grains du sol).

En résumé :

- Si le sol est trop sec : difficulté de compactage → on doit arroser le sol
- Si le sol avec bonne teneur en eau : facilité de compactage
- Si le sol est trop humide : difficulté de compactage → le mélanger avec un sol sec ou l'assécher par aération ou par scarification.

3.4.2 Influence de la nature du sol

L'allure des courbes de compactage varie avec la nature du sol ; très aplaties pour un sable (γ_d peu influencée par la teneur en eau), alors qu'elles présentent un pic très marqué pour une argile (γ_d fortement influencée par la teneur en eau).

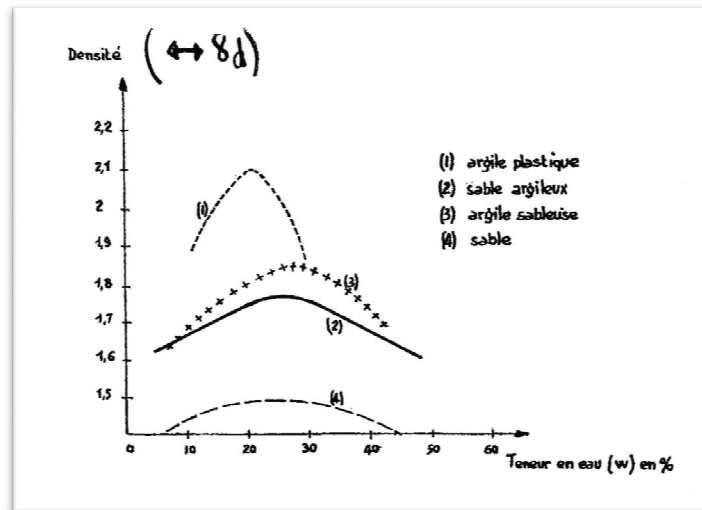


Figure 3.3 : Influence de la teneur en eau sur la courbe de compactage

3.4.3 Influence de l'énergie de compactage

Les courbes de compactage ci-après correspondent à un sol donné soumis à des compactages différents.

Lorsque l'énergie de compactage augmente, γ_d maximale augmente et la teneur en eau optimale correspondante diminue.

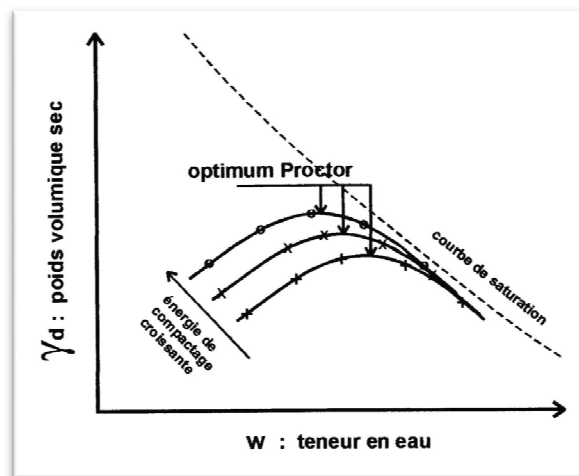


Figure 3.4 : Influence de l'énergie de compactage sur la courbe de compactage

- *Nombre de passes du compacteur :*

La masse volumique du sol augmente avec l'augmentation du nombre de passes, et atteint un maximum. Un trop grand nombre de passes peut avoir pour effet de briser les particules (écrasement des grains), donc de produire des fines susceptibles d'augmenter la capillarité des matériaux (effet inverse de l'objectif recherché). Sans parler du facteur coût de l'opération du compactage.

- *Vitesse du compacteur :*

Avec les compacteurs vibrants, pour un nombre de passes données, la masse volumique sera plus grande avec une faible vitesse. Par contre, si cette vitesse est trop faible, ceci a pour effet de faire augmenter les coûts du compactage.

- *L'épaisseur de la couche compactée :*

Etant donné que la masse volumique dans une couche compactée de grande épaisseur décroît normalement du haut vers le bas, elle doit être plus élevée en surface que celle exigée dans les spécifications pour obtenir à la base de cette couche la masse volumique désirée. En réduisant l'épaisseur des couches, le surplus de compactage dans la partie supérieure peut être évité; cette différence est plus appréciable dans les sols cohérents que granulaires. Pour ces raisons, plusieurs organismes limitent l'épaisseur des couches à 30 cm même avec des compacteurs très puissants.

3.5 Essais de compactage en laboratoire

On recourt le plus souvent à l'essai Proctor normal ou modifié.

Un échantillon de sol, de teneur en eau connue, est compacté dans un moule aux dimensions normalisées par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonctions successives de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différentes teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple (w, γ_d), donc un point de la courbe de compactage.

Les essais peuvent être réalisés dans deux types de moules, on peut utiliser le moule Proctor ou le moule C.B.R.

La teneur en eau d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement. Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, il est nécessaire de déterminer la teneur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité.

L'essai Proctor consiste à simuler le compactage en laboratoire pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre du matériau sur le chantier.

L'essai Proctor permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol. Garantir un compactage suffisant permet, entre autres, d'assurer une bonne portance.

Le poids volumique sec γ_d correspond au poids de squelette placé dans un certain volume. Il constitue donc un bon indicateur de la compacité.

Les trois paramètres qui contrôlent la variation de poids volumique sec γ_d sont :

- la granulométrie,
- l'énergie de compactage,
- la teneur en eau.

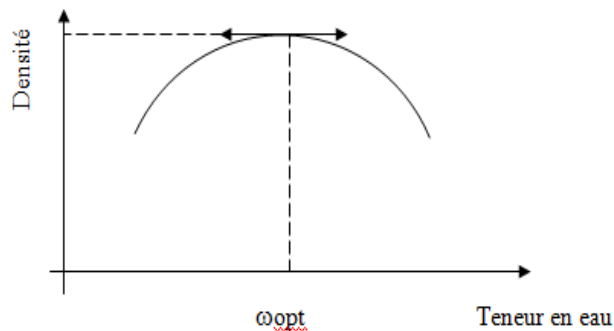


Figure 3.5: Courbe de l'essai proctor

Les courbes $\gamma_d = f(w)$ sont asymptotiques à la courbe de saturation d'équation (avec $S_r = 1$) :

$$\gamma_d = \frac{S_r \cdot \gamma_s}{S_r + \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w}}$$

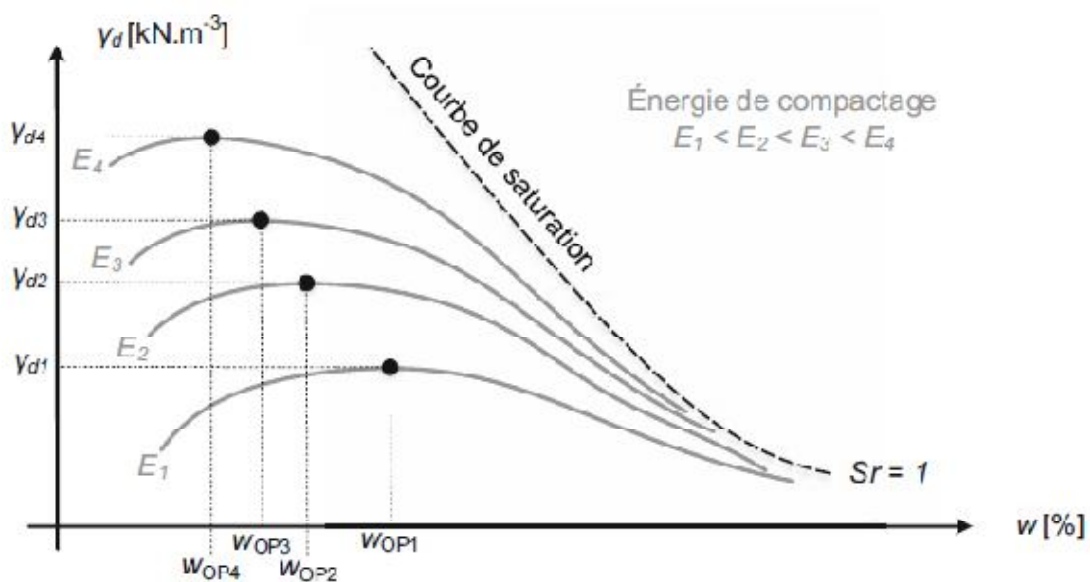


Figure 3.6: Diagramme Proctor : $\gamma_d = f(w)$ et courbe de saturation

L'énergie de compactage dépend de la destination de l'ouvrage,

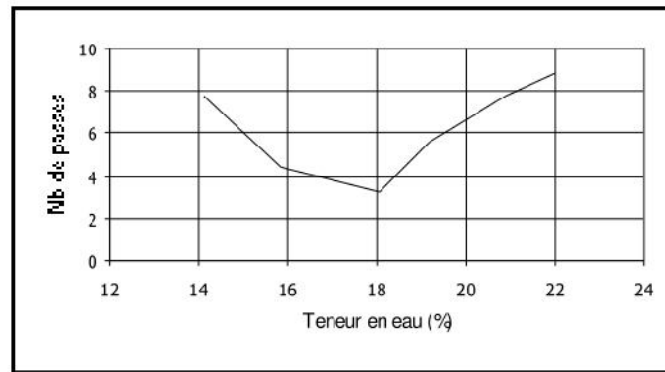
On distingue :

Essai Proctor normal et essai Proctor modifié:

- Energie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues,...)
- Energie de compactage intense pour fondation de chaussées, pistes d'aérodromes, ...). Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

Tableau 3.1 : Comparaison entre l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié

Essai Proctor normal	Essai Proctor modifié
Le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de remblais en terre (barrages et digues).	Le compactage est beaucoup plus intense ; Il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec rouleaux à pneus lourds modernes.
Il s'effectue en trois (03) couches avec « la dame Proctor normal »,	05 couches avec la dame Proctor modifié
L'énergie de compactage est de 25 coups par couche dans le moule Proctor normal.	L'énergie de compactage 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R. C'est ordinairement par <u>l'essai Proctor modifié</u> que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optima, densité sèche maxima) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes et des pistes d'aérodromes.
Le moule Proctor est cylindrique métallique inoxydable de 10,15 cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles.	Le moule Proctor modifié est de 15,2 cm de diamètre intérieur et 15,2 cm de hauteur,
La dame Proctor normal qui est constitué par un mouton de 2,49 kg (cylindrique de 5,1 cm de diamètre) dont la hauteur de chute est de 30,4 cm.	La dame Proctor modifié est constitué par un mouton de 4,53 kg (cylindrique de 5,1 cm de diamètre) dont la hauteur de chute est de 45,7 cm.



courbe d'étalonnage d'un engin de compactage.

Figure 3.8 : Courbe d'étalonnage

3.7 Vérification du compactage in situ

Le problème revient à prélever un échantillon, à mesurer son volume et son poids (estimation de γ_h), puis déterminer son poids après passage à l'étuve, ce qui permet de déterminer w et par suite γ_d .

La plus grande difficulté réside dans la détermination du volume de l'échantillon prélevé.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- Méthode de l'anneau volumétrique : on enfonce graduellement dans le sol un cylindre d'un volume d'un demi-litre, en dégagant le pourtour au fur et à mesure de l'enfoncement. Mais on risque de comprimer l'échantillon lors de l'opération, d'où erreur sur le compactage. De plus, si le sol comporte des graviers ou cailloux, l'enfoncement devient difficile, sinon impossible.
- Méthode dite à l'huile : on exécute dans le terrain un prélèvement de six à sept litres et on remplit le trou d'huile, de densité connue, à partir d'un récipient que l'on pèse avant et après le remplissage → on en déduit le volume.
- Méthode dite du sable : même principe, l'excavation étant remplie de sable sec bien calibré.
- Méthode du nucléodensimètre : cet appareil permet de déterminer directement une densité grâce à l'absorption de neutrons émis par une source radioactive, d'où la possibilité de nombreux essais non destructifs sur chantier.
- Méthode de congélation : les sables saturés ne changent pas de densité lorsqu'on les congèle. Il est donc facile de prélever un échantillon et de mesurer son volume.

3.7.1 Mesure de la masse volumique des matériaux d'assises en place – méthode au densitomètre à membrane - NF P 94-061-02 :

L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane. L'appareil est doté d'un piston qui, sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple étanche qui épouse la forme de la cavité.

Une tige graduée permet de lire directement le volume. Le matériau de la cavité est séché afin de déterminer son poids sec.

Cet essai ne s'applique pas lorsque le volume de la cavité de mesure peut varier durant l'essai (sable lâche, argile très humide, ...). Cet essai est plus particulièrement destiné aux matériaux dont D_{\max} est inférieur à 50 mm.

Le résultat de la masse Volumique sèche (γ_d) en kg/m^3 .

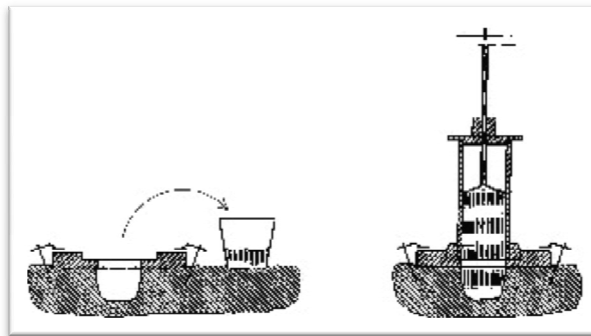


Figure 3.9: Densitomètre à membrane

3.7.2 Mesure de la masse volumique des matériaux d'assises en place – mesure par gammadensimètre en transmission directe - NF P 98-241-1 :

L'essai a pour but de déterminer la masse volumique moyenne des matériaux situés entre la partie supérieure libre d'une couche et une cote donnée (z) à l'aide d'un gammadensimètre.

La mesure est fondée sur l'absorption par le matériau des photons gamma d'énergie donnée, émis par une source enfouie à la profondeur Z dans la couche soumise à l'essai. Le nombre C de photons gamma traverse le matériau par unité de temps et il est directement lié à la compacité et la teneur en eau du matériau. La mesure est fondée sur l'absorption par le matériau des photons gamma d'énergie donnée, émis par une source enfouie à la profondeur Z dans la couche soumise à l'essai. Le nombre C de photons gamma traverse le matériau par unité de temps et il est directement lié à la compacité et la teneur en eau du matériau.

Le gammadensimètre est calibré avant chaque utilisation sur un bloc de référence de travail dont la masse volumique est connue. Cet appareil est soumis à une réglementation stricte ne matière de protection radionucléaire et seuls les opérateurs autorisés portant un dosimètre sont habilités à l'utiliser.

Il peut être utilisé sur les matériaux hydrauliques (terrassment, grave ciment, grave non traité) ou hydrocarbonés (enrobé si épaisseur supérieure à 5 cm).

Expression du résultat de la masse volumique sèche (γ_d) en kg/m^3 ; la teneur en eau (W) est en en % (pour matériau hydraulique)

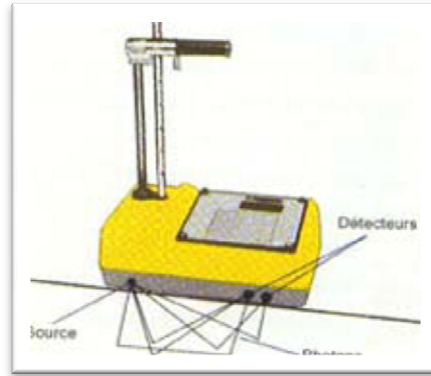


Figure 3.10: Gammadensimètre

3.8 Techniques et matériel de compactage

Les engins à utiliser lors de l'opération de compactage dépendront de la nature du terrain et de l'importance du travail à effectuer.

On utilise :

- des rouleaux lisses : ils peuvent être " statiques " c'est-à-dire agir par pression uniquement (ces rouleaux sont de moins en moins utilisés sauf pour le cylindrage d'enduits superficiels et le compactage d'enrobes très minces < 4 cm) ou vibrants, le mode de compactage alliant ici la vibration en plus de la pression.
- des rouleaux à pieds dameurs (encore appelés " a pieds de mouton " : ils peuvent être statiques ou vibrants; en plus de la pression et éventuellement de la vibration, ils produisent un pétrissage du sol et sont particulièrement indiquées pour le compactage de terrains argileux. Un lissage est nécessaire après leur emploi.
- des rouleaux à pneus : utilisés pour des terrains non cohérents.
- des plaques vibrantes.
- des engins pilonneurs.

Notons encore que quels que soient les engins utilisés, le compactage devra s'effectuer par couches de faibles épaisseurs de 20 à 30 cm maximums.

Il existe encore de nombreuses autres techniques permettant de compacter les sols.

Chapitre 4 : Portance

4.1 Introduction

La réalisation d'une chaussée nécessite une portance minimale de la plate-forme (et donc indirectement de l'arase) au moment des travaux : c'est la portance à court terme. Si cette portance est insuffisante, une amélioration est nécessaire pour réaliser la chaussée.

La portance de la plate-forme (PF) c'est l'aptitude des couches sous-jacentes à résister aux contraintes et aux déformations appliquées par la circulation et transmises par l'intermédiaire des couches supérieures constituant le corps de chaussée.

A court terme : la portance de la plate-forme désigne les valeurs estimées ou mesurées sur le chantier lors de la réalisation

A long terme : elle désigne les valeurs que l'on retient pour le dimensionnement et que l'on vise lors de la conception

4.2 Les essais déterminant le comportement mécanique du sol sous le trafic

Il s'agit de l'essai CBR (immédiat et après immersion), de l'essai à la plaque,

Ils sont utilisés pour la détermination des caractéristiques mécaniques et la portance de la couche de forme

4.2.1 Essai de plaque E_v et M_E

L'essai de chargement à la plaque destiné dans le domaine routier à l'acquisition des données nécessaires à l'appréciation et au contrôle de la portance du sol et des couches de chaussée.

Cet essai peut être réalisé pour les sols, de couche de forme, traités à la chaux, mais pas aux matériaux traités aux liants hydrauliques.

But de l'essai:

- Mesurer la portance des sols (jusqu'à une profondeur de 1.5D) (Classement des sols dans des classes de portance)
- Portance et contrôle du compactage de la couche de fondation, de la couche de forme et/ou du terrain naturel

Exécution de l'essai:

- Chargement et déchargement par palier d'une plaque rigide
- Mesurer les tassements

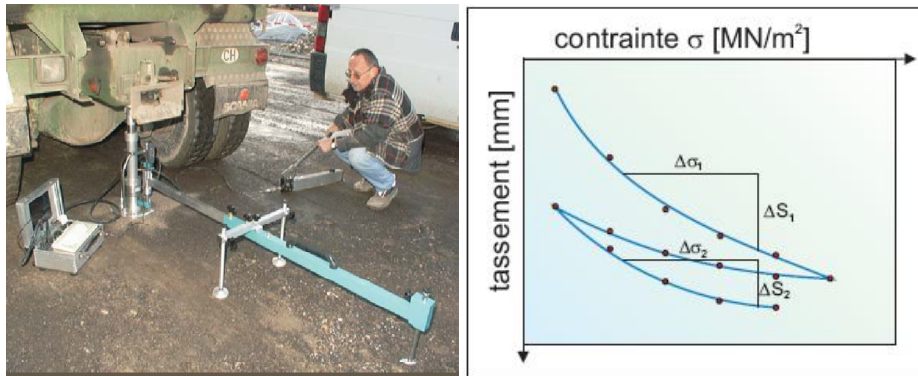


Figure : 4.1 : Essai de plaque

Principe de l'essai :

On mesure le tassement vertical de la plaque de chargement soumise à l'action d'une charge verticale par palier.

Le résultat d'essai est représenté par la courbe de charge : pression appliquée (en abscisse) et tassement mesuré (en ordonnées).

Le module EV1 (ME1) est calculé à partir de la courbe obtenue pour le 1er cycle de chargement et le module EV2 (ME2) à partir du 2^e cycle de chargement.

Remarque : la surface examinée doit être plane, homogène et libre de toute surcharge dans un rayon de 4D minimum.

Dans le cas des sols plastique la teneur en eau doit être :

$$w \leq w_L - 0,75 (w_L - w_P)$$

Expression des résultats:

$$M_{E1} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta S_1} \cdot D \quad M_{E2} = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta S_2} \cdot D \quad D: \text{Diamètre de la plaque}$$

♦ Valeurs M_E [MN/m ²]		
♦ Portance des sols:	M_{E1} [MN/m²]	Portance
	> 60	très élevée
	15 - 30	moyenne
	< 6	très faible
♦ Exigences pour couche de fondation en graves:		
	• trafic léger: > 80 MN/m ²	
	• trafic moyen: > 100 MN/m ²	

Le chargement est maintenu pour les deux cycles jusqu'à constatation de la stabilisation de l'enfoncement de la plaque.

$$m = \frac{M_E \text{ au deuxième cycle de chargement}}{M_E \text{ au premier cycle de chargement}}$$

Le rapport m est élevé $\gg 1$: le matériau n'a pas encore atteint son maximum de compacité

Le rapport m est proche de 1 : le matériau a atteint son maximum de compacité

4.2.2 Essai CBR (*California Bearing Ratio*)

But de l'essai :

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent de :

- Etablir une classification des sols (GTR)
- Evaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI)
- Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue)

L'épaisseur d'une chaussée est fonction de:

- Trafic et des charges par essieu prévus.
- Sol sous-jacent, et des conditions hydriques futures que subira cette route

Principe de l'essai :

La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

P: pression appliquée par le pneumatique sur le sol de fondation.

S: surcharge simulant l'action de la chaussée qui s'oppose au déplacement vertical du sol de fondation lors de l'action du pneu.

On peut reproduire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai Proctor dans un moule CBR puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de ce matériau.

Nota : un essai Proctor est effectué simultanément avec l'essai CBR

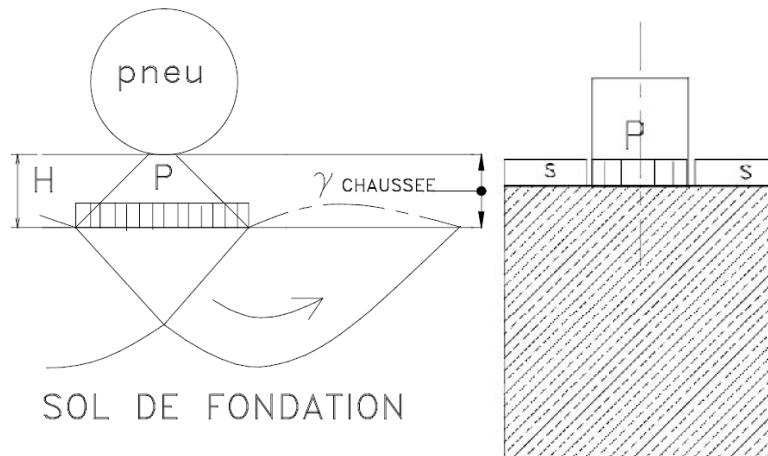


Figure 4.2: Schéma de l'essai CBR

On lui applique les conditions hydriques prévues pendant la vie de l'ouvrage:

- * immersion pendant 4 jours dans de l'eau.
- * pas d'immersion : essai immédiat.

On applique ensuite une charge voisine de ce que sera la charge de service et on poinçonne

Le matériau dans des conditions déterminées (vitesse constante et déterminée) tout en mesurant les efforts (F) et les déplacements (Δh) en résultant: On obtient la courbe d'essai.

Une comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur un sol de référence (tout venant de concassage) est ensuite effectuée. (Courbe ETALON)

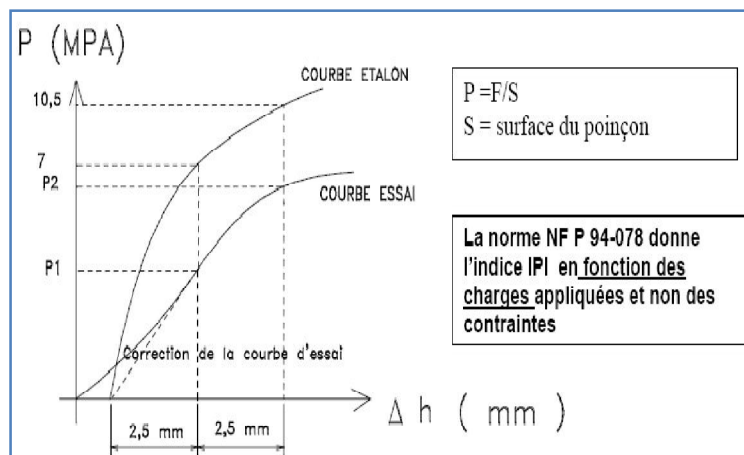


Figure 4.3: Courbe de l'essai CBR

L'indice CBR est donné par :

$$\text{C.B.R.} = 100 \times \text{Max} \left(P1 / 7 ; P2 / 10,5 \right)$$

Une comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur un sol de référence (tout venant de concassage) est ensuite effectuée. (Courbe ETALON)

On mesure 3 types d'indices en fonction des buts fixés :

- l'indice Portant immédiat (IPI): Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux ($H = 0 \Rightarrow$ pas de surcharges S)
- l'indice C.B.R. immédiat: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.
- l'indice C.B.R. après immersion: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.

Expression des résultats:

Selon le tableau 4.1 ci dessous.

Tableau 4.1: Classification de la portance des sols selon GTR

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

Chapitre 5 :

Dimensionnement des chaussées

5.1 Introduction

La structure d'une chaussée routière doit résister à diverses sollicitations auxquelles elle est soumise, notamment celles dues au trafic et elle doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation. L'application d'une charge roulante induit ainsi une déformation en **flexion** des couches de la structure. Cette flexion entraîne des sollicitations en **compression** au droit de la charge et des sollicitations en **traction** à la base des couches d'**enrobés**. Les structures de chaussées sont souvent soumises à des phénomènes complexes (mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent souvent de manière couplée.

Le dimensionnement des structures de chaussée constitue une étape importante de l'étude d'un projet routier. Il s'agit simultanément de choisir les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée. Afin d'assurer de bonnes caractéristiques mécaniques qui lui permettra de résister à toutes les charges pendant toute sa durée de vie.

Tout cela en fonction de paramètres fondamentaux suivants :

- Le trafic.
- L'environnement de la route (le climat essentiellement)
- Le sol support

5.2 Constitution et rôle d'une chaussée

Les chaussées sont des structures multicouches surmontant un ensemble appelé plate-forme (support de chaussée le plus souvent protégé par une couche de forme).

La chaussée peut donc être schématisée par une succession d'un certain nombre de couches de natures et d'épaisseurs différentes. Elle a pour fonction de transmettre les efforts au sol (via la couche de forme) en garantissant des déformations dans les limites admissibles.

En général, les différentes couches qui constituent la structure de chaussée sont décrites ci-après, les couches de fondation, de base et de surface constituent la structure de la chaussée, la

couche de forme ainsi que la PST (partie supérieure des terrassements) font référence au terrassement.

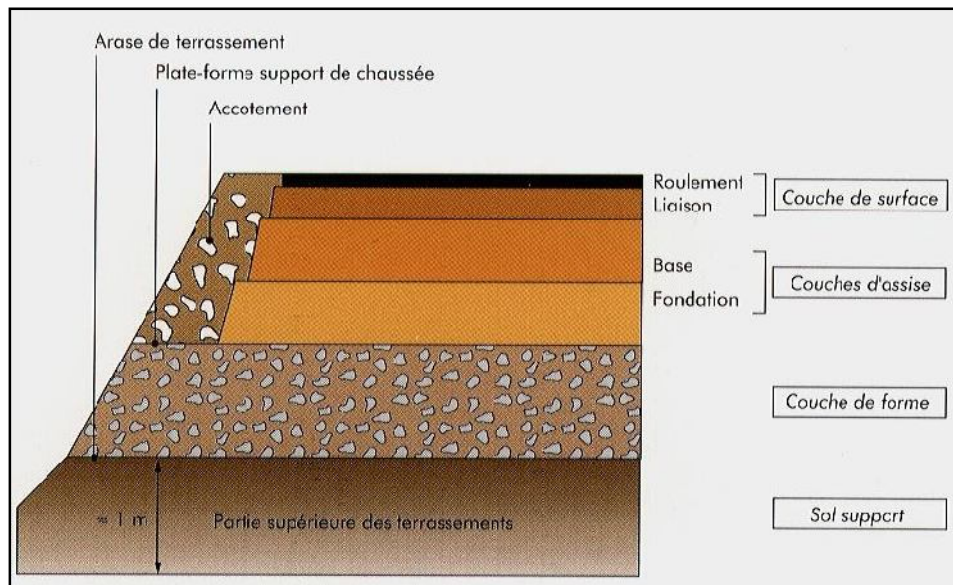


Figure 5.1 : Les différentes couches d'une chaussée

5.2.1 La couche de forme

Bien que ne faisant pas partie de la chaussée proprement dite, elle participe à son intégrité de part ses fonctions :

Pendant les travaux, elle contribue au nivellement et assure la traficabilité du chantier.

Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et le protège, notamment contre le gel.

5.2.2 Les couches d'assises

L'assise de chaussée (ou corps de chaussée) se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation et la couche de base.

Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique nécessaire pour reprendre les charges verticales induites par le trafic. Elles repartissent les pressions sur le sol support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

- Couche de fondation :

La construction de cette couche ne pose pas de problème particulier.

La plupart des matériaux routiers conviennent.

- Couche de base :

La construction de cette couche doit faire l'objet d'une attention toute spéciale : le matériau utilisé dans cette couche doit pouvoir résister aux contraintes résultant du trafic.

5.2.3 La couches de surface

Elle a aussi généralement une structure bicouche, avec :

La couche de roulement, qui est la couche supérieure, sur laquelle s'appliquent directement les actions du trafic et du climat, et la couche de liaison : Son apport structurel est secondaire (sauf pour les chaussées à assise granulaire, dont la couche de surface est la seule couche liée); elle est plutôt tributaire de la pérennité de la chaussée et doit satisfaire à quatre objectifs principaux :

- La sécurité et le confort des usagers, qui dépendent directement des caractéristiques de surface
- Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis à vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaçage et des divers polluants susceptibles d'être répandus en surface
- L'impact sur l'environnement, qui consiste essentiellement en la réduction des bruits de roulement
- Les possibilités de régénération des caractéristiques de surface

5.3 Les différents types de chaussée

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants : chaussées souples, chaussées semi-rigides et chaussées rigides.

5.3.1 Les chaussées souples

Les chaussées souples constituées par des couches superposées des matériaux non susceptibles de résistance notable à la traction, les couches supérieures sont généralement plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures. Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige généralement pour sa construction, plusieurs couches exécutées en matériaux différents, d'une épaisseur bien déterminée, ayant chacune un rôle aussi bien défini.

5.3.2 Les chaussées semi –rigides

On distingue :

- Les chaussées comportant une couche de base (et quelquefois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, laitier granulé...)

La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelquefois par l'intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé hydrocarboné sur la couche de base traitée dont l'épaisseur strictement minimale doit être de 15 cm, ce type de chaussée actuellement n'existe pas en Algérie.

- Les chaussées comportant une couche de base et/ou une couche de fondation en sable gypseux, on les rencontre fréquemment dans les zones arides.

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation).

5.3.3 Les chaussées rigides

Elles sont constituées d'une dalle de béton de ciment, éventuellement armée (correspondant à la couche de surface de chaussée souple) reposant sur une couche de fondation qui peut être un grave stabilisé mécaniquement, une grave traitée aux liants hydrocarbonés ou aux liants hydrauliques. Ce type de chaussée est pratiquement inexistant en Algérie (Figure 5.1).

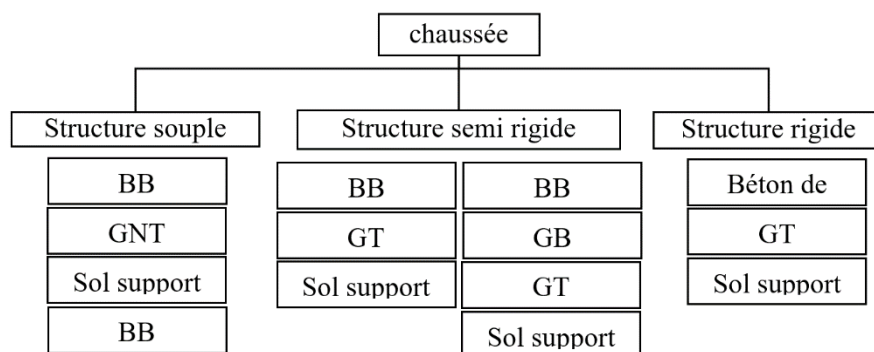


Figure 5.2 : les différents types de chaussée

BB : béton bitumineux.

GB : grave bitume.

GT : grave traitée.

GNT : grave non traité.

5.4 Méthodes de dimensionnement des structures de chaussée

Le dimensionnement d'une structure de chaussée routière consiste à concevoir une structure capable de supporter un trafic pour une durée de vie fixée. Il s'agit de déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux diverses agressions auxquelles elle sera soumise tout au long de sa vie.

Il existe différentes méthodes pour bien appréhender cette déformation. Elles donnent lieu ensuite à différents modèles de dimensionnement.

Le trafic pris en compte est celui du **poids lourd**, c'est-à-dire des véhicules dont le poids total est supérieur à 3,5 tonnes.

Les Paramètres de calculs pris en compte lors du dimensionnement de structure de chaussées sont : le trafic, le coefficient d'agressivité, La durée de vie : • 20 ans, 30 ans, et la portance de la plate-forme

On distingue deux familles des méthodes :

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées.

Les méthodes du dimensionnement de corps de chaussée les plus utilisées sont :

- La méthode de C.B.R (California -Bearing - Ratio):
- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP).
- Méthode du catalogue des structures (SETRA).

5.4.1 Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio)

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90 à 100%) de l'optimum Proctor modifié.

Pour que la chaussée tienne, il faut que la contrainte verticale répartie, suivant la théorie de BOUSSINESQ, soit inférieure à une contrainte limite qui est proportionnelle à l'indice CBR. L'épaisseur est donnée par la formule suivante :

$$e = \frac{100 + (\sqrt{p})(75 + 50 \log \frac{N}{10})}{I_{CBR} + 5}$$

Avec :

- e: épaisseur équivalente
- ICBR: indice CBR (sol support)

- N: désigne le nombre journalier de poids lourd à vide à l'année horizon
- P: charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t)
- Log: logarithme décimal

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante :

$$e = \sum_{i=1}^n a_i \cdot e_i$$

Donc pour la chaussée de trois couches: $e = a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3$

Où:

- a_1, a_2, a_3 : coefficients d'équivalence de matériau par référence à un grave concassé.
- e_1, e_2, e_3 : épaisseurs réelles des couches.

Le tableau 5.1 ci-dessous indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

Tableau 5.1 : les coefficients d'équivalence pour chaque matériau

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment – grave laitier	1.50
Sable ciment	1.00 à 1.20
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée – grave sableuse et T.V. O	0.75
Sable	0.50
Grave bitume GB	1.50

5.4.2 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves 'CTTP'

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées : trafic, matériaux, sol support.

Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée. La méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode rationnelle qui se base sur deux approches :

- Approche théorique.
- Approche empirique.

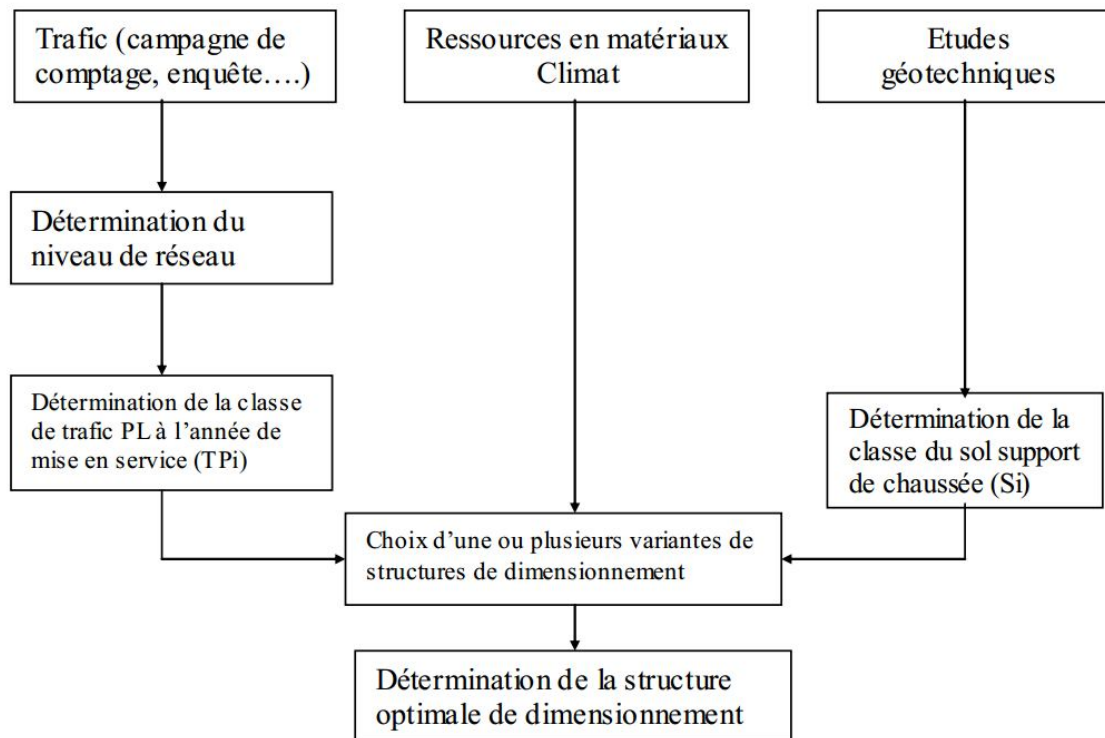
Démarche du catalogue :

Figure 5.3 : Démarche du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP)

5.4.3 Méthode du catalogue des structures types de chaussées neuves 'SETRA'

Le catalogue des structures types de chaussées neuves est établi par «SETRA », Il est présenté sous forme de fiches (ou notices d'utilisation):

La présentation de la démarche de détermination d'une structure de chaussée se base sur des études préalables concernant: trafic, ressources en matériaux, géologie, géotechnique et climat.

Les types de structures de chaussées sont distingués suivant les matériaux employés. Quatre classes de trafic sont considérées selon leur importance, allant de 200 à 1500 Véhicules/jours. Il tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Classe de trafic cumulé de poids lourds à la 20e année Tj

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic poids lourd par sens circulant sur la voie la plus chargée à l'année de mise en service. Les classes de trafics adoptées sont dans le tableau suivant (Tableau 5.2). Le trafic cumulé est donné par la formule:

$$T_c = T_{PL} \left[1 + \frac{(1 + \tau)^{n+1} - 1}{\tau} \right] 365$$

Avec:

- TPL: trafic poids lourds à l'année de mise en service
- n : durée de vie.

Tableau 5.2 : La classe du trafic poids lourd

Classe du trafic	Trafic poids lourd cumulé sur 20ans
T ₀	$T < 3,5 \times 10^5$
T ₁	$3,5 \times 10^5 < T < 7,3 \times 10^5$
T ₂	$7,3 \times 10^5 < T < 2 \times 10^6$
T ₃	$2 \times 10^6 < T < 7,3 \times 10^6$
T ₄	$7,3 \times 10^6 < T < 4 \times 10^7$
T ₅	$T > 4 \times 10^7$

Classe du sol support:

La classe du sol est déterminée à partir de l'indice CBR mesuré sur éprouvette compactée aux conditions de l'optimum Proctor (essai Proctor modifié). Après immersion de quatre jours, le classe du sol se fait en se référant au tableau suivant (Tableau 5.3):

Tableau 5.3 : Classe de sol en fonction CBR [SETRA]

Classe du sol support	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
Indice CBR (MPa)	>40	25-40	10-25	05-10	< 05

Bibliographie

Nicolae BOS, Voies de communications, Route et Travaux Maritimes, OPU, 1979.

Fred PORTET et Olivier NOËL, Géotechnique routière V4, 2- La reconnaissance des sols, 2011.

Fred PORTET et Olivier NOËL, Géotechnique routière V4, 3- La classification des sols, 2011.

Hervé BRUNEL, Cours de Route, Université d'Orléans, I.U.T. de Bourges, 2007.

M. ROBERT, Matériaux, Durabilité des chaussées. Cours de Master 2 Génie-Civil, Tome 1, 2011. http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/8Compactage_cours-routes_procedes-generaux-de-construction.pdf

Jean BERTHIER, Projet et construction de routes, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-travaux-publics-et-infrastructures-tiace/archive-1/projet-et-construction-de-routes-c5500/>

Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, 2ème Edition, Juillet 2000.

Michel Ruban, Maîtrise de la qualité en construction routière, presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2012.

LCPC-SETRA. Guide des terrassements routiers : Réalisation des remblais et des couches de forme, .Guide technique, France. Ed. IFSTTAR (ex. LCPC), France.

R. Coquand. Routes. Ed. Eyrolles.

P. Carillo. Conception d'un projet routier. Guide technique. Ed. Eyrolles, 2015.

Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes (Algérie), Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves, 2011.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Direction des routes (France). Catalogue des structures types de chaussées neuves, 1998.