

MODULE : MDS (2^e année LMD ST)

CHAPITRE 3

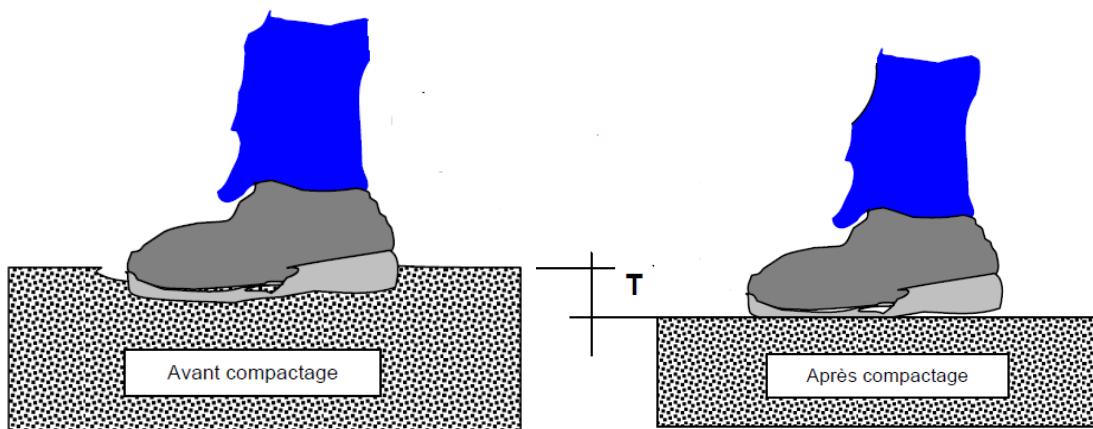
COMPACTAGE DES SOLS

- **THEORIE DE COMPACTAGE**
- **ESSAI DE COMPACTAGE EN LABORATOIRE**
- **ESSAI DE CBR**
- **MATÉRIEL DE COMPACTAGE SUR CHANTIER**

1. Théorie de compactage

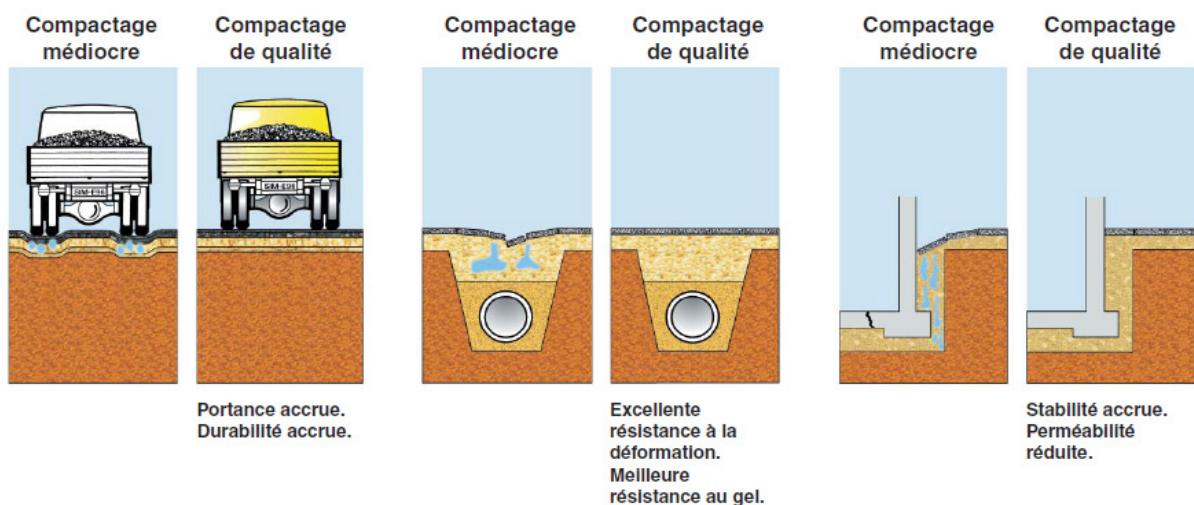
Le sol est l'un des matériaux le plus disponible sur site. Son utilisation dans la construction des barrages en terre, des routes, des aéroports et des lignes de chemin de fer est très économique. Toutefois, la mise des remblais au hasard sans aucune intention d'améliorer leur qualité entraîne la réalisation des structures instables. Il est donc très important de bien placer le matériau et de le compacter.

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Celle-ci est due essentiellement à la diminution de la quantité d'air dans ses pores. Le changement de volume d'eau n'est pas significatif, c'est ce qui la différencie fondamentalement de la consolidation



Le but du compactage est de resserrer la texture du sol (Diminuer les variations de volume indésirables), réduire les possibilités de déformation, augmenter sa capacité portante et sa résistance au cisaillement et diminuer la perméabilité de sol.

D'un sol



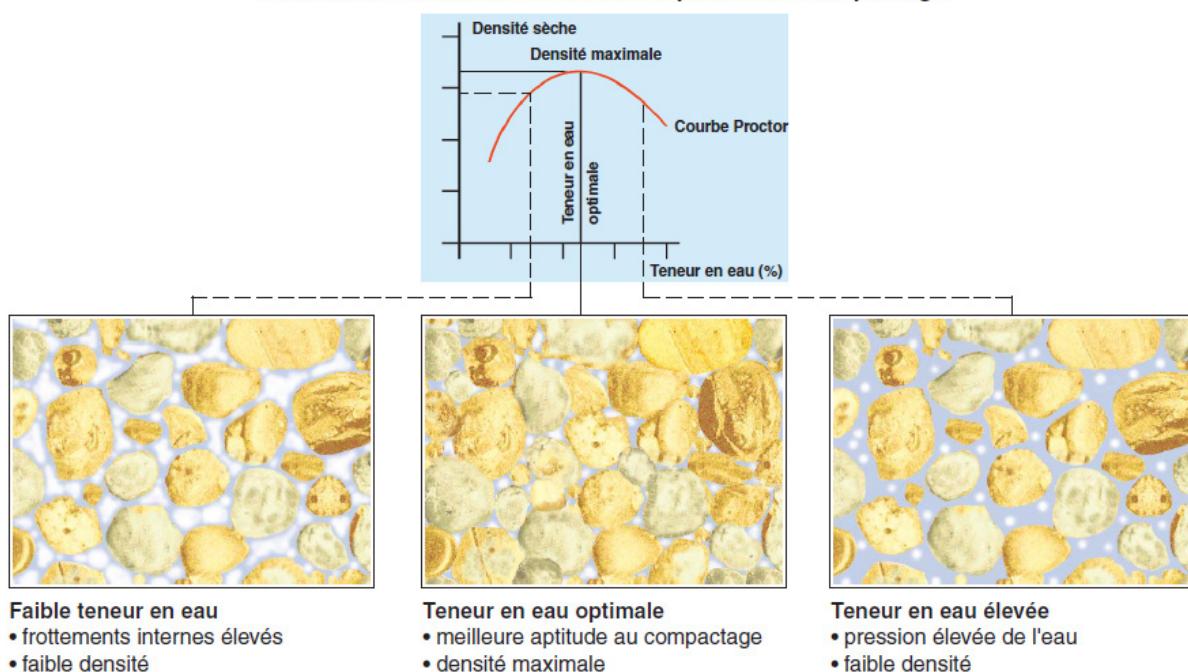
Le degré de compactage d'un sol se mesure en fonction de sa masse volumique sèche c'est-à-dire la masse des particules solides par unité de volume de sol et la teneur en eau.

Donc le compactage est fonction de quatre paramètres:

- *La masse volumique du sol sec,*
- *La teneur en eau,*
- *Energie de compactage,*
- *Type de sol (granulométrie, minéralogie,...).*

*Pour le compactage d'un sol donné, la teneur en eau de mise en place à un impact significatif, la relation teneur en eau – densité « **courbe de compactage** » ($\gamma_d - w$) constitue donc une information importante.*

Influence de la teneur en eau sur l'aptitude au compactage



2. Essai de compactage en laboratoire :

2.1. Essai Proctor :

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire:

- *La teneur en eau optimale: w_{op}*
- *La densité sèche maximum correspondante: γ_{op}*

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'énergie de compactage dépend de destination de l'ouvrage on distingue:

- *L'essai Proctor normal*: énergie de compactage modérée pour remblais en terre (barrage, digue,,,,)
- *L'essai Proctor modifié*: énergie de compactage intense pour fondation de chaussées, pistes d'aérodromes,,,ect, il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

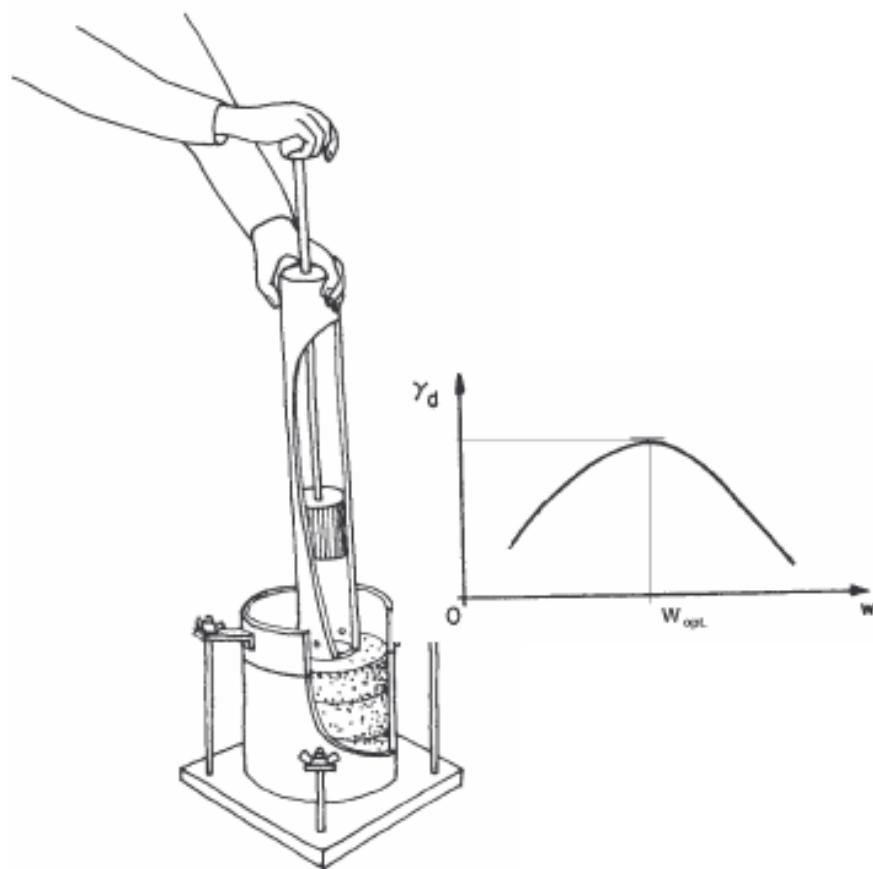


Figure : Essai de compactage (moule + dame).

Pour l'essai Proctor normal, un échantillon de sol est compacté en trois couches dans un moule normalisé avec une certaine énergie fournie par une dame d'un poids de 2.49 kg tombant dans une hauteur constante (30.5cm). Par contre, l'énergie fournie dans l'essai Proctor modifié par une dame de 4.54Kg avec hauteur de chute de 45.7cm.

Le tableau ci-dessous donne les différents caractéristiques pour les essais Proctor, où deux types de moules sont identiques à savoir le moule Proctor et le moule CBR (California Bearing ratio). Leurs dimensions respectives sont aussi données le deuxième tableau.

Essai proctor	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage Kj/dm ³
Normale	2.49	30.5	25 proctor	3	0.59
			55 CBR	3	0.53
Modifié	4.54		25 proctor	5	2.71
			55 CBR	5	2.41

Moule Proctor	Moule CBR
Hauteur 11.7 cm	Hauteur 51.2 cm
Diamètre 10.2 cm	Diamètre 15.2 cm
Dimension des grains $\leq 5\text{mm}$	Dimension des grains $5 < D \leq 20\text{mm}$

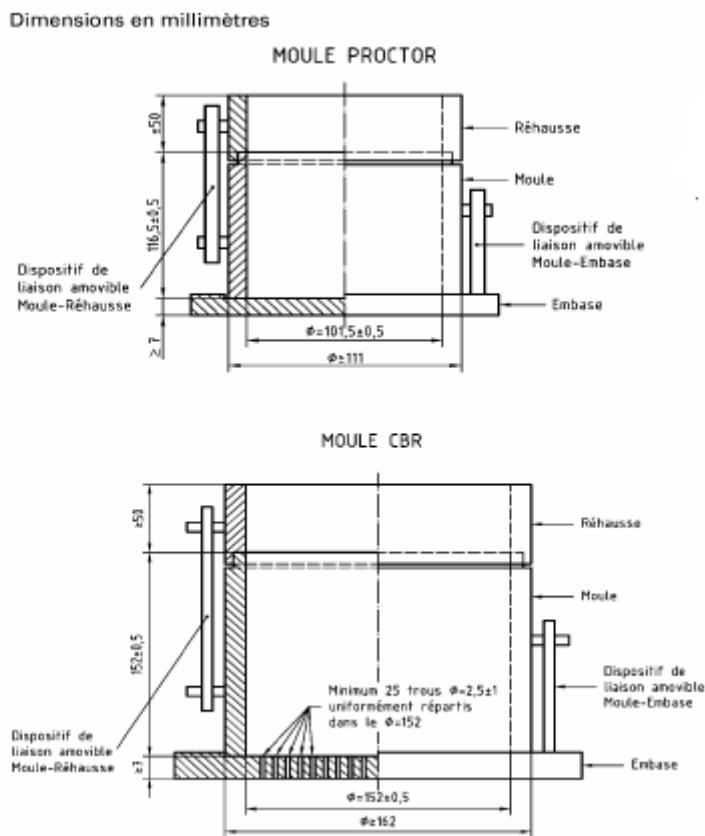


Figure : les moules utilisées pour l'essai de compactage.

Pour les deux méthodes de compactage, l'essai est réalisé sur plusieurs échantillons chacun à une teneur en eau différente, un minimum de 5 échantillons est recommandé. Leurs masses volumiques humides et sèches sont ensuite déterminées et les résultats sont interprétés en représentant la variation masse volumique en fonction de la variation de la teneur en eau.



- Si tout l'air est expulsé par le compactage, donc on a l'état de saturation complet et γ_d peut être calculée par :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + w_{sat}}$$

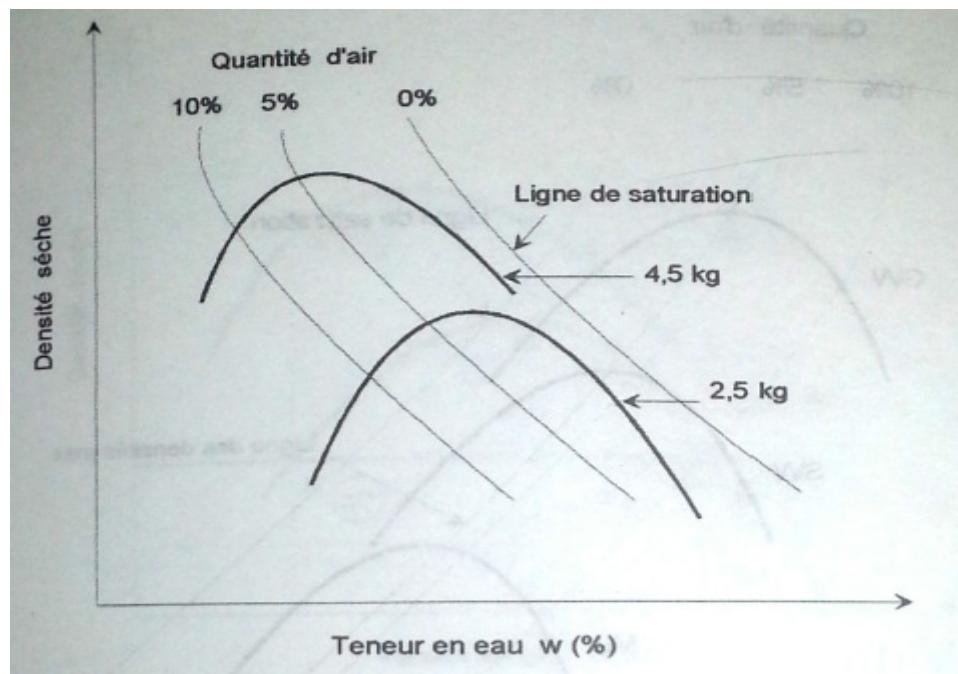
Si non on peut calculer γ_d par la formule suivante :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+w}$$

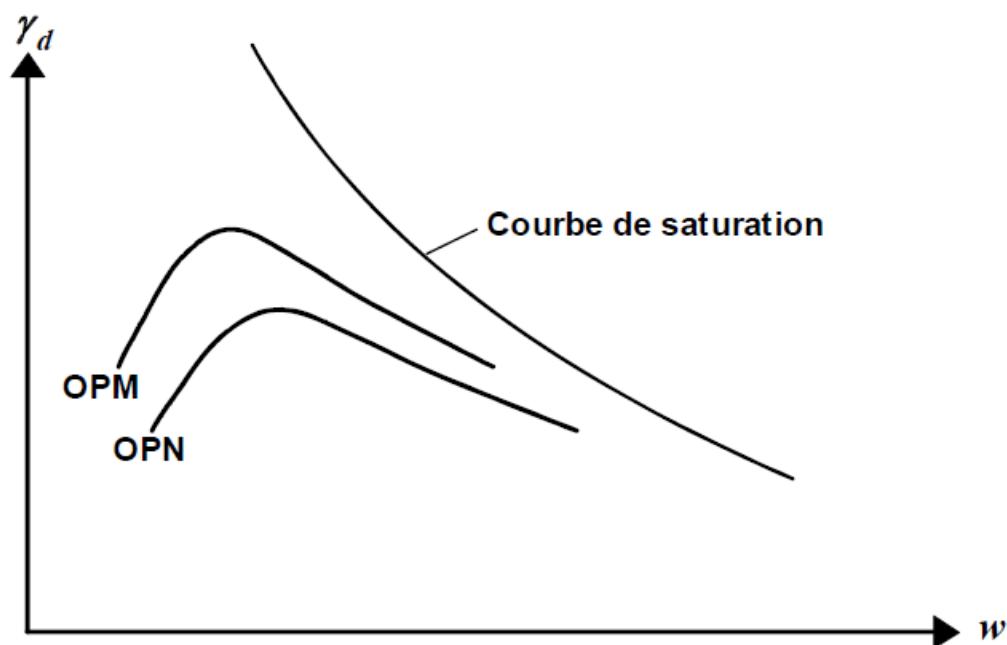
ou bien par

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+\frac{w\gamma_s}{S\gamma_e}}$$

La figure ci-dessous montre que les courbes sont toujours du côté gauche de cette ligne de saturation (100%).



Si l'énergie de compactage croît, les courbes deviennent plus pointues, l'eau étant incompressible,



Donc pour l'augmentation de l'énergie de compactage tend à augmenter la densité sèche et à réduire la teneur en eau optimale correspondant

3. Essai California Bearing Ratio « CBR »:

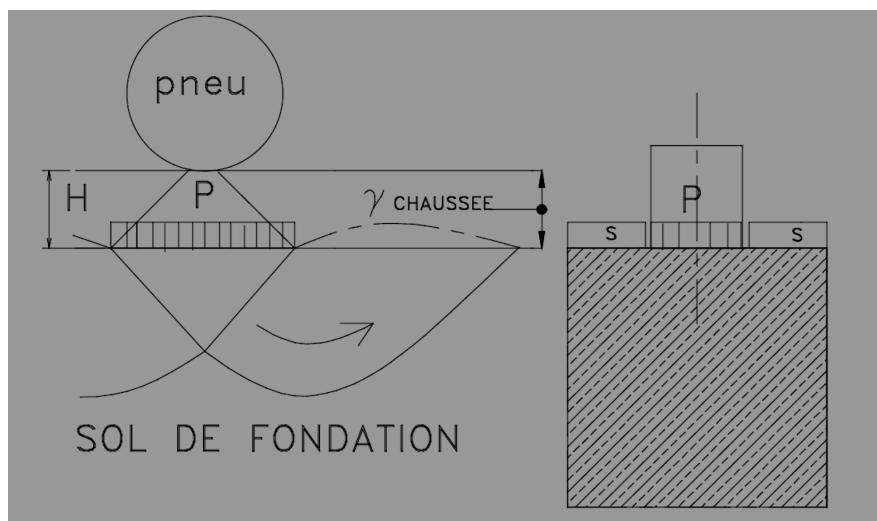
C'est un essai d'aptitude des matériaux à supporter les charges (remblai, couche de forme.....etc.).

Son objectif est de déterminer :

- Indice Portant Immédiat « IPI » : c'est une grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantiers.
- Indice CBR immédiat et Indice CBR après immersion : des grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, entant que support ou constituant d'une structure de chaussée.

Les intérêts de cet essai est d'établir une classification de sol, évaluer la traficabilité des engins de terrassement « IPI » et de déterminer l'épaisseur des chaussées.

Le principe de l'essai est donné par la figure ci-dessous :



Donc la simulation du cas réel (pneu-sol de fondation) peut faire en laboratoire par l'appareil CBR (piston-échantillon de sol compacté) pour déterminer la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant 4 jours, plus Il nous permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement (La norme qui définit cet essai porte la référence NF P 94-078).

Mode opératoire :

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation), pour lesquels on veut réaliser l'essai.

Lorsque la dimension maximale des éléments du sol étudié est inférieure à 20 mm, l'intégralité du sol est soumise à l'essai.

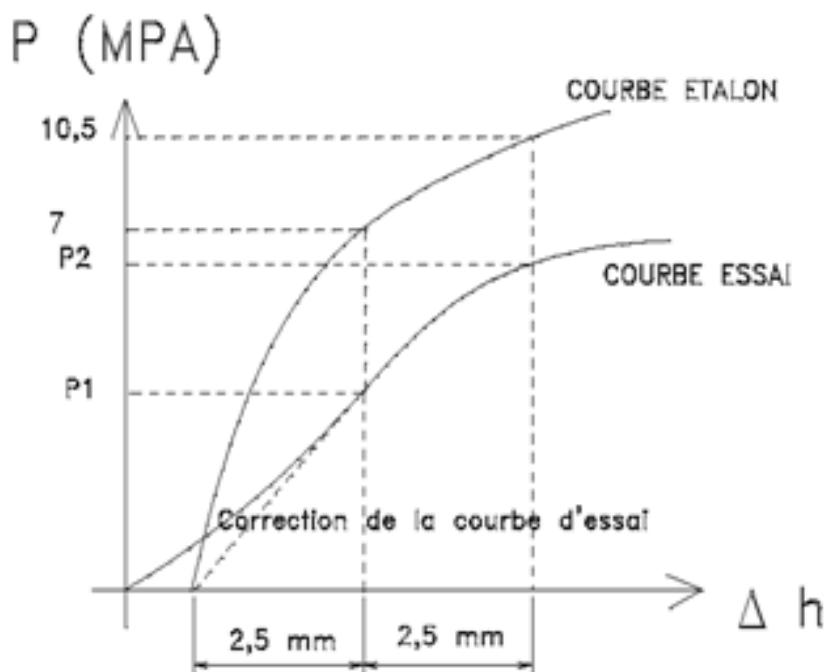
Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm, dans une proportion inférieure à 30%, ils sont éliminés par tamisage.

On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage (moule CBR ou Proctor). Dans le cas où l'on détermine l'I.CBR recherché ;

- *Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI, placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement*
- *Si l'objet de l'essai est la détermination de l'I.CBR immédiat, interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4.6kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse.*
- *Si l'objet de l'essai est la détermination de l'I.CBR immersion : Placer un papier-filtre à la surface puis disposer au-dessus le disque de gonflement et les surcharges comme indiqué précédemment.*

Finalement, on calcule les valeurs suivantes :

$$\text{Indice CBR recherché} = \text{Max} \left(\frac{\frac{\text{effort de pénétration à } 2.5 \text{ mm d'enfoncement(en KN)}}{13.35} \times 100}{\frac{\text{effort de pénétration à } 5 \text{ mm d'enfoncement(en KN)}}{19.93} \times 100} \right)$$



4. Matériel de compactage sur chantier

4.1. Introduction :

Le matériel de compactage sera choisi, suivant :

- *les disponibilités,*
- *type de sol à traiter*
- *but recherché.*

Equipement	Sols les plus indiqués	Application	Sols les moins indiqués
Rouleau lisse, vibrant ou non	Sables ou graviers bien gradués, concassé, asphalte	Pistes, sous-coffres	Sables à granulométrie uniforme
Rouleau à pneus	Sols grenus (grossiers) contenant un peu de fines.	Sous-coffre de pavement	Sol grossiers à granulométrie uniforme, cailloux
Rouleau à grille	Roche altérée, sols grossiers bien gradués.	Sous-coffre	Argiles, argiles limoneuses, sols à granulométrie uniforme.
Rouleau à pieds de moutons non vibrant.	Sols fins à plus de 20% de fines	Barrages, remblais, sous-coffres	Sols grossiers et caillouteux.
Rouleau à pieds de moutons vibrant.	Idem précédent, + mélanges sables-graviers	Couches de fondation	
Plaque vibrante	Sols grossiers à 4 à 8 % de fines	Petites surfaces	Argiles et limons
Dames, pilons	Tous	Endroits peu accessibles	
Rouleau à impact (modèles légers)	Sols humides à saturés		Sables et graviers secs

4.2. Compactage en surface

Contient les engins suivants :

- *Rouleau lisse vibrante ou non ;*
- *Rouleau à pneu ;*
- *Rouleau à grille ;*
- *Rouleau à pied de mouton ;*
- *Plaque vibrante lourde ;*
- *Pilon ;*
- *Dame ;*
- *Rouleau à impacte.*

4.3. Compactage en profondeur

Les applications les plus courantes du compactage en profondeur sont:

- l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol pour des projets d'infrastructure (ports, aéroports),
- la diminution des risques de liquéfaction dans les zones à activité sismique.

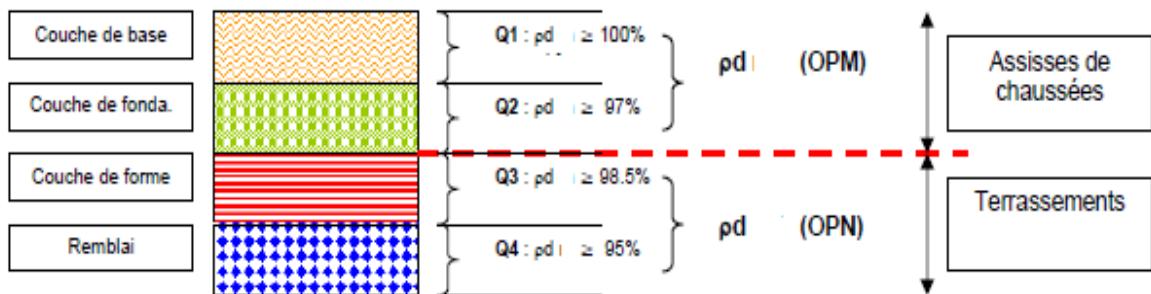
Le compactage en profondeur s'exécute selon deux familles de méthodes, selon que l'énergie est transmise au sol depuis la surface, ou sous la surface

- Compacteur dynamique (25t , 25m)
- Rouleau à impacte (50 t)
- Vibro-sonde (10 à 15 m)
- Vibro-flotation (3 à 5m).

5. Contrôle de compactage

La masse volumique seche obtenu sur chantier doit etre égale à un certain pourcentage au moins de la masse volumique optimale obtenue par l'un des essais au laboratoire (voir la figure) :

$$90 \leq I_d = \frac{\rho_{d \text{ insitu}}}{\rho_{d \text{ labo}}} \leq 100 \%$$



La méthode du « gamma-ddensimetre » est la plus connue pour mesurer la masse volumique seche in-situ . cet essai et basée sur l'utilisation du rayonnement gamma. Il a pour but de mesurer la masse volumique en place de matériau d'une épaisseur donnée se prête à

l'introduction, à partir de la surface, d'une source radio-active de faible dimension. (voir figure).

