

Chapitre 3: Compactage des sols

3.1. Théorie de compactage

3.1.1. Définition

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aéroports. La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Modification de la granulométrie.
- Modification de la teneur en eau.
- Réduction ou élimination des risques de tassement.
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus.
- Amélioration de la capacité portante.
- Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait.

3.1.2 Théorie du compactage (théorie de Proctor)

C'est en 1933 que l'Ingénieur américain PROCTOR mit en évidence l'influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur le poids spécifique sec d'un sol grâce à l'essai qui porte son nom : **Essai proctor**

Proctor a montré que le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, l'énergie de compactage et le type de sol (granulométrie, minéralogie,...). En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau w d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec en fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui représente un optimum appelé OPTIMUM PROCTOR.

Ce phénomène s'explique aisément ; Lorsque la teneur en eau est élevée (partie droite de la courbe), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage sans aucun profit de plus elle occupe la place des grains solides (aucun tassement possible). Par contre pour des teneurs en eau raisonnable, l'eau joue un rôle lubrifiant non négligeable et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (partie gauche de la courbe).

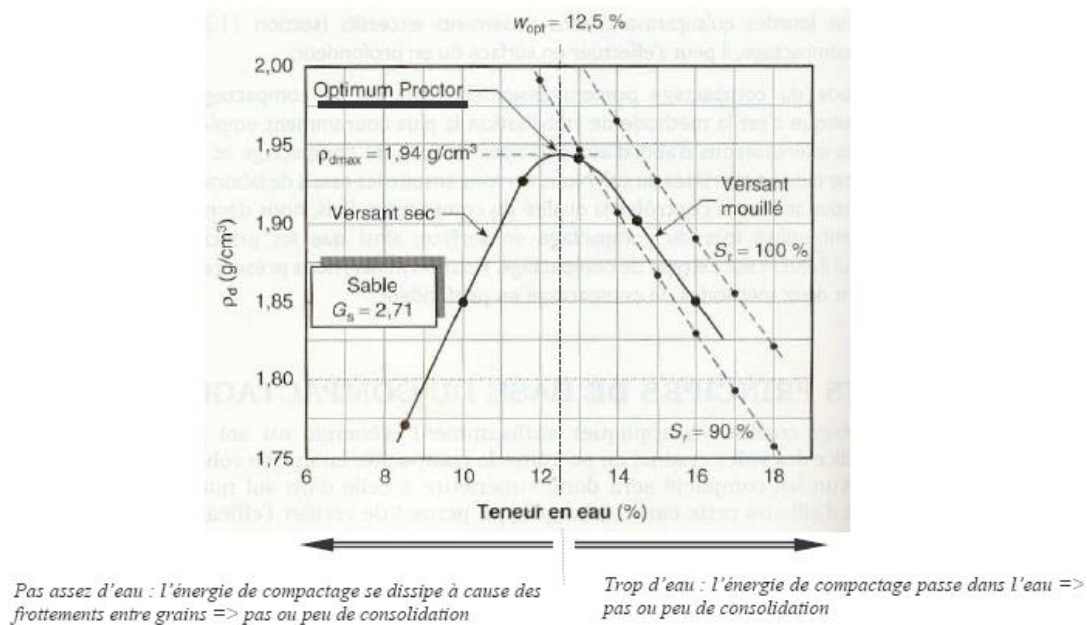


Fig.3.1 Courbe de compactage pour une énergie de compactage donnée.

3.1.2.1. Influence de la nature du sol

De façon générale, la courbe Proctor est très aplatie pour les sables et par contre présente un maximum très marqué pour les argiles plastiques.

Pour les matériaux à courbe Proctor aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau. Ces matériaux (courbe Proctor aplatie) constituent donc à priori les meilleurs remblais d'un point de vue tolérance à l'exécution, car peu sensibles à la teneur en eau réellement ou non apportée par des camions citernes ou les pluies. Mais, par contre, il est plus difficile d'améliorer les caractéristiques de ces sols (Energie de compactage à fournir plus importante).

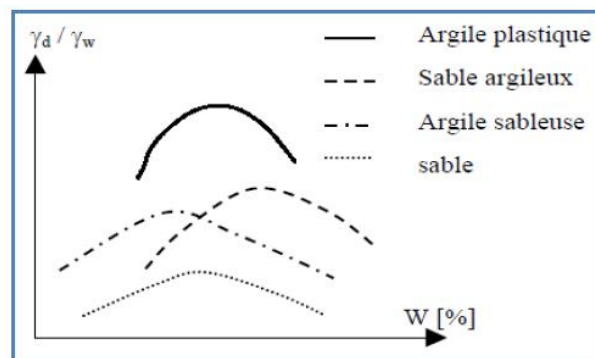


Fig.3.2 : Influence de la nature du sol sur l'optimum proctor

3.1.2.2. Influence de l'énergie de compactage : courbes de compactage

La figure ci-après montre l'influence de l'énergie de compactage sur les courbes de l'essai Proctor . Pour un sol donné, si l'énergie augmente, le poids volumique maximum augmente et les courbes deviennent plus pointues.

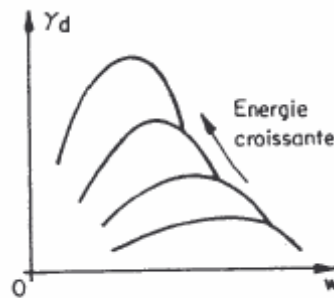


Fig.3.4 : Influence de l'énergie de compactage

3.1.2.3. Enveloppe des courbes de compactage : Courbe de saturation

Les courbes de compactage admettent pour enveloppe une courbe appelée courbe de saturation, qui correspond à l'état saturé du sol. L'équation de cette courbe est :

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s \cdot \omega + \gamma_w}$$

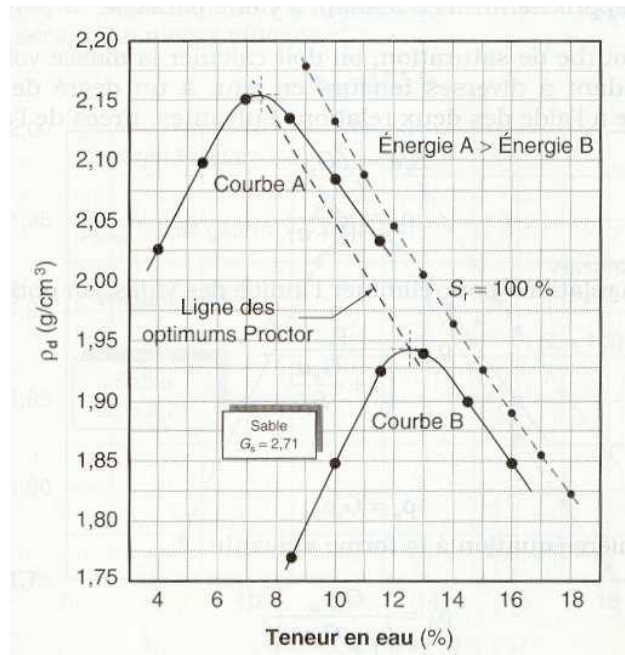


Fig. 3.5 : Courbe de saturation

3.2 Essais de compactage en laboratoire (Essais Proctor et CBR)

3.2.1. Essais Proctor

3.1.1. L'essai PROCTOR

But : L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d / \gamma_w; \omega$) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale (cf. Fig.3.1).

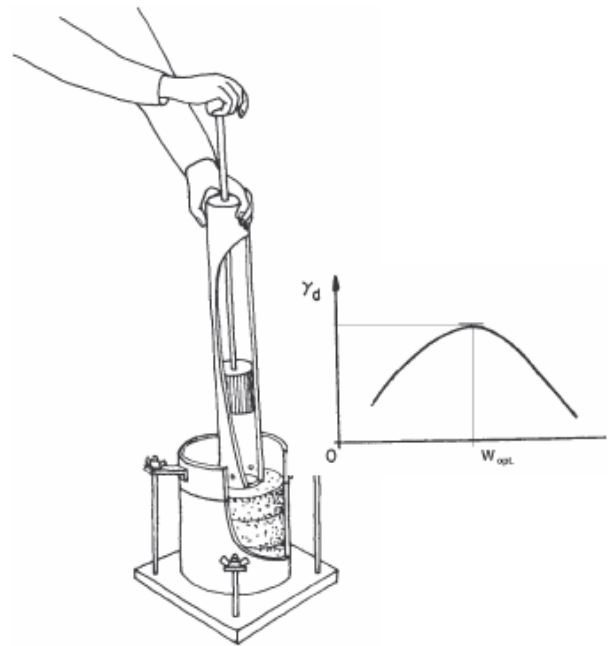


Fig.3.6 : Essai Proctor

On utilise pour ces essais deux types de moules de dimensions différentes :

- Le moule Proctor ($\phi_{moule} = 101,6 \text{ mm} / H_{de \text{ sol}} = 117 \text{ mm}$) lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs 5mm),
- Le moule CBR (California Bearing Ratio) pour des matériaux de dimensions supérieures à 5mm et inférieures à 20mm ($\phi_{moule} = 152 \text{ mm} / H_{de \text{ sol}} = 152 \text{ mm}$).

Avec chacun de ces moules, on peut effectuer (énergie normalisée de compactage choisie) respectueusement l'essai Proctor normal (pour Tx de compactage en bâtiment et/ou de barrage) et l'essai Proctor modifié (pour Tx de compactage routier essentiellement).

Le tableau ci-dessous précise les conditions de chaque essai.

	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage Kj/dm ³
Essai Proctor	Normal 2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	0,59
			55 (moule CBR)	3	0,53
	Modifié 4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2,71
			55 (moule CBR)	5	2,41

Tab. 1 : Conditions des essais Proctor normal et Modifié

3.1.2. L'indice portant californien CBR : Essai CBR

But : Déterminer un indice permettant de calculer grâce à des abaques l'épaisseur des couches de fondation d'une route nécessaires à la constitution d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu prévus et des conditions hydriques futures que subira cette route. Il est déterminé pour des sols à vocation routière de manière purement empirique.

L'Indice Portant Californien est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau à étudier d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part. Il caractérise implicitement la tenu au poinçonnement d'un sol.

Le matériau à étudier est placé dans un moule dans un état donné de densité et de teneur en eau.

Il est ensuite poinçonné par un piston de $19,3 \text{ cm}^2$ de section, enfoncé à la vitesse constante de $1,27 \text{ mm/min}$.

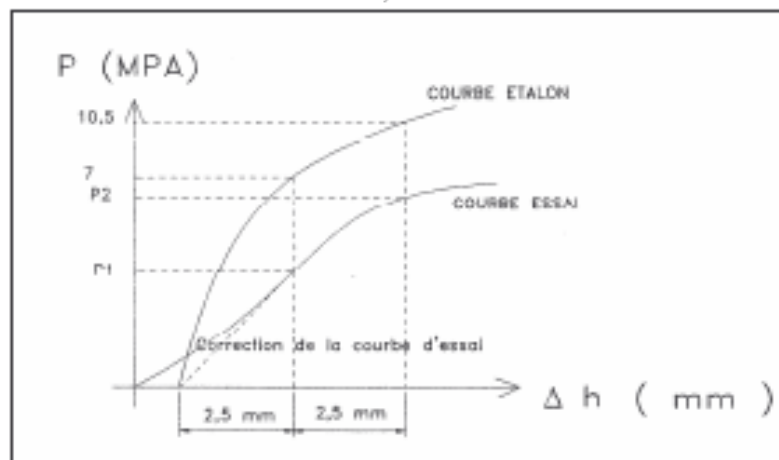
L'indice de portance ou CBR exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition c'est indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Pression à } 2,5 \text{ mm d'enfoncement}}{0,7}$$

$$0,7$$

$$\frac{\text{Pression à } 5 \text{ mm d'enfoncement}}{1,05}$$

$$1,05$$



Le pouvoir portant d'un sol routier est d'autant meilleur que le CBR est grand.

A noter :

On distingue 2 types d'essais CBR en fonction des buts fixés :

- **L'essai C.B.R. immédiat** : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle. **Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation en phase de chantier** (Voir paragraphe « notion de planche d'essai » ci-après). Dans les régions peu humide, le C.B.R. immédiat sert directement de référence (pas de variation hydrique).
- **L'essai C.B.R. après immersion** : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé durant plusieurs jours (4 en générale). **Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes teneur en eau et/ou soumis à des variations de régime hydrique.**

3.3. Matériel et procédés spéciaux de compactage in-situ

3.1 Procédés courants de compactage

Dans les procédés courants de compactage, on utilise :

a- Vibration : Pour les sols pulvérulents et granulaires, le compactage efficace se fait par vibration en utilisant : plaque vibrante manuelle, rouleau vibrant autopropulsé, rouleau à pneus et grosse masse en chute libre.

b- Pylons à air comprimé : Pour le compactage des couches de faibles épaisseurs :

- Dames à explosion (grenouille) pour les terrains cohérents ou non de faible surface.
- Pylons de 2 à 3 tonnes montés sur grue roulante, est utilisé pour tous les terrains mais ne sont intéressants que pour les faibles surfaces.

c- Rouleaux lisses : sont utilisés pour les terrains cohérents non argileux.

d- Rouleaux à pneus : pour le compactage des terrains non cohérents.

e- Rouleaux à pieds de mouton : pour les terrains cohérents. En particulier il est indispensable pour les terrains argileux.

f- Engins vibrant (rouleaux, sabots,...) : pour les sols à gros grains (sables et graviers).

3.3.2 Procédés spéciaux de compactage

Dans le cas de couches à grandes épaisseurs, on utilise des procédés de compactage dynamique tels que :

a- Compactage par explosifs

- **Explosifs ponctuels** : pour les sols pulvérulents le compactage se fait par création d'une onde de choc de compression.
- **Explosifs linéaires** : pour les sols cohérents le compactage se fait par mise en place de pieux sableux.

b- Compactage par vibroflotation

Le procédé consiste à la génération de contraintes et déformations alternées d'où réarrangement des grains.

- **Tubes en vibration** : se pratique pour les matériaux très perméables.
- **Colonnes ballastées** : les colonnes sont formées de matériaux pulvérulents compactés. Elles sont pratiquées dans les sols cohérents.

c- Consolidation dynamique

Elle est valable pour tout type de sol. Il s'agit de transmettre des chocs de forte énergie à la surface du sol à traiter (chute libre d'une masse de 10 à 30 tonnes exceptionnellement 140 tonnes d'une hauteur de 15 à 30 m). La profondeur d'influence est définie par Léonard et coll. (1980) grâce à l'expression :

$$D = \frac{1}{2} w \cdot h \text{ [m]}$$

Où w est la masse tombante exprimée en tonne, h est la hauteur de chute en mètre.

3.4 Prescriptions et contrôle du compactage

Malgré l'extrême diversité des engins de compactage, il est possible de dégager un certain nombre de facteurs intervenant principalement sur l'efficacité d'un engin sur un sol donné.

- facteurs propres au terrain compacté (nature, teneur en eau)
- facteurs caractérisant l'engin et la séquence de compactage (nombre de passes, vitesse, pression de contact, fréquence et intensité de vibration...)

Quels que soient les engins utilisés le compactage sur chantier devra s'effectuer par couche de faible épaisseur 20 à 30cm (TX de route) ou encore 10 à 15 cm (TX de bâtiment).

3.4.1. Notion de planche d'essai

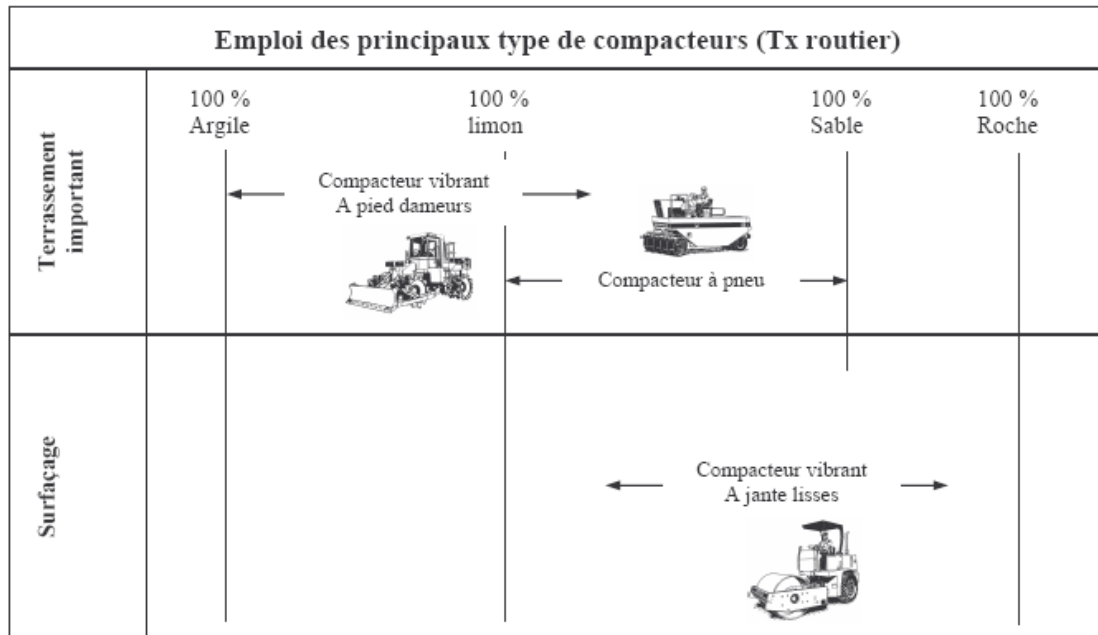
Une grande partie des difficultés des projets de terrassement vient du fait que la mise en place d'un sol (remblai par exemple) dépend souvent des conditions atmosphériques au moment des travaux.

La planche d'essai permet avant l'ouverture d'un chantier de terrassement, de fixer les paramètres de compactage liés à l'engin utilisé, au sol considéré au moment des travaux (teneur en eau, vitesse des engins, nombre de passe, ...), et ce, en vue d'obtenir la compacité à atteindre (compacité prescrite).

3.4.2. Influence de la vitesse de l'engin.

Pour un engin donné et des exigences de qualité fixées, il existe une vitesse optimale, fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus la vitesse de translation optimale a une valeur réduite.

Il est recommandé de limiter la vitesse de la plus part des compacteurs à 8km/h. Dans le cas des compacteurs vibrants, la vitesse optimale se situe autour de 5km/h pour que les vibrations puissent agir efficacement sur toute l'épaisseur de la couche.



3.4.3. Influence du nombre de passes

De façon générale il faut 3 à 8 passes pour compacter une couche de sol de 30 cm d'épaisseur, mais ce nombre peut facilement atteindre 12 en fonction du type de sol, de la teneur en eau et de la masse du compacteur. Si la compacité voulue n'est pas atteinte après 12 passes dans les conditions optimales d'humidité, on conclut que les opérations de compactage n'ont pas atteint leur but et que le compacteur utilisé n'est probablement pas adéquat.

En pratique la teneur en eau fixée à la valeur optimale de l'essai Proctor est obtenue par étalonnage de la citerne à eau. Pour chaque vitesse de l'engin considéré on détermine le nombre de passes permettant d'obtenir les spécifications prescrites. On peut ainsi représenter la courbe (Vitesse de l'engin, Nombre de passes) et déterminer son optimum qui donne les paramètres liés à l'engin.

3.4.4. Degré de compacité (efficacité d'un compactage par rapport à ce qui est prescrit)

En comparant le poids volumique du sol sec sur le chantier ($\gamma_{d \text{ chantier}}$) avec le poids volumique sec maximal (optimum proctor $\gamma_{d \text{ opt.}}$) on établit le degré de compacité D_C ou pourcentage de compactage à l'aide de l'équation :

$$D_c = \frac{\gamma_{d \text{ chantier}}}{\gamma_{d \text{ opt. proctor}}}$$

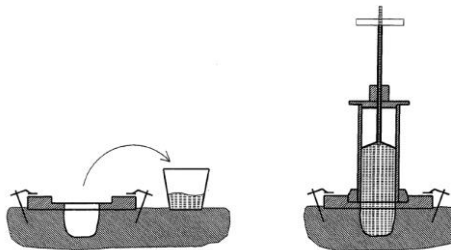
Le degré de compacité est l'un des critères sur lesquels on s'appuie pour accepter ou refuser un compactage. Ce degré qui s'exprime en pourcentage, tend vers 100% lorsque la valeur de $\gamma_{d \text{ chantier}}$ tend vers celle de $\gamma_{d \text{ opt. proctor}}$. En général le cahier des charges impose $D_c \geq 95\%$ (voir 98 %).

Plus D_c est élevé, plus la compacité du sol est grande et plus le compactage a été efficace.

3.4.5. Moyens de contrôle de compactage sur chantier

3.4.5.1. Densitomètre à membrane

But : Mesurer les masses ou poids volumiques apparents des sols (humide g , ou sec gd) en place avant foisonnement, ou encore après tassement ou compactage.



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.

3.4.5.2. Gammadensimètre -TROXLER-

Le TROXLER 3450 permet les mesures ponctuelles de la teneur en eau et de la masse volumique moyenne apparente sur les sols naturels, les assises traitées (au bitume, ciment ...) ou non traitées (sable, matériaux concassés ...), les couches de forme, les matériaux de terrassement et les couches de roulement de faible épaisseur.



Les résultats affichés automatiquement permettent une lecture rapide des différents paramètres de la mesure tels que : - Profondeur de mesure (mm) - Epaisseur de la couche de roulement (mm) - Durée de comptage - Densité Humide (kg/m³) - Teneur en eau (%) - Indice des vides (%) - Compacité (%) - Référence de compacité

