

Chapite 3

LE COMPACTAGE DES SOLS

1. GENERALITES

Le compactage est l'ensemble des mesures prises pour augmenter la densité apparente sèche $\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_w} \right)$ du sol traité. Ce qui conduit à réduire son volume apparent (par diminution de l'indice des vides).

Cette densification n'est pas un but en soi. Elle est recherchée parce qu'elle entraîne d'autres conséquences :

- La première, liée à la notion de compacité, est la suppression ou du moins **la limitation des tassements**. Cet objectif, qu'il soit spécialement recherché ou non, est toujours atteint ou au moins partiellement par le compactage,
- La deuxième conséquence est **la diminution de la perméabilité** de la couche traitée afin de s'opposer à l'écoulement de d'eau,
- Une troisième conséquence possible du compactage est **l'amélioration des caractéristiques mécaniques** qui en résultent généralement : portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement, résistance au cisaillement.

Pour les sols fins, une réserve s'impose, une augmentation de compacité pouvant à des teneurs en eau élevées, entraîner une diminution brusque de la portance et du module de déformation.

On examinera dans ce chapitre successivement :

- L'influence de certains paramètres sur le compactage au laboratoire et sur le chantier ;
- Le compactage au laboratoire et le compactage in situ ;
- L'effet du compactage sur les propriétés hydrauliques et mécaniques du matériau traité ;

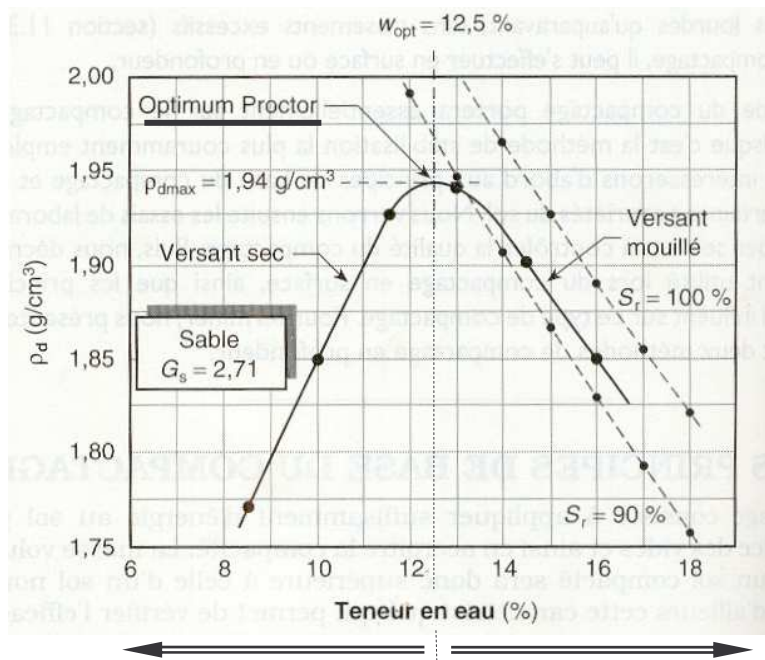
2. FACTEURS D'INFLUENCE

2.1. Influence de la teneur en eau : courbes de compactage

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

En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau ω d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec γ_d 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).



Pas assez d'eau : l'énergie de compactage se dissipe à cause des frottements entre grains => pas ou peu de consolidation

Trop d'eau : l'énergie de compactage passe dans l'eau => pas ou peu de consolidation

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

2.2. 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).

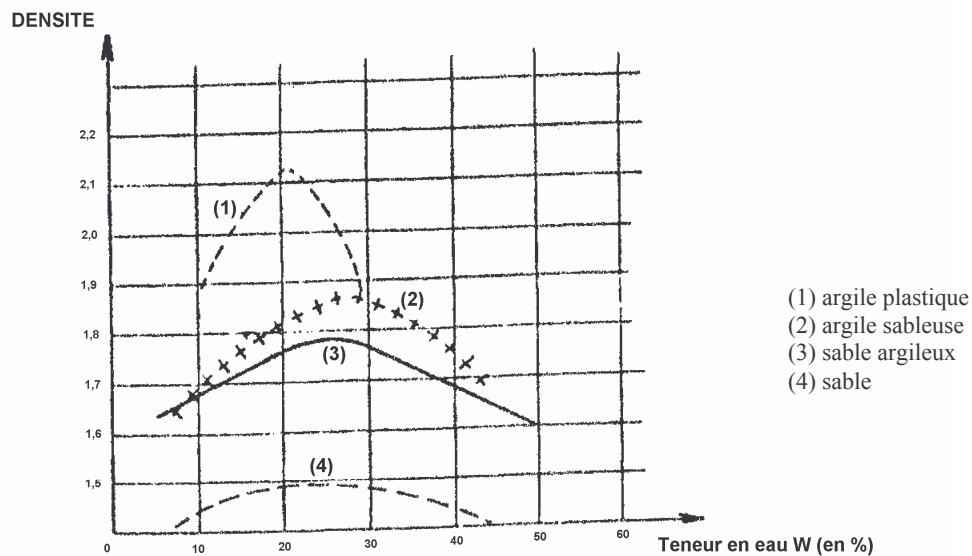


Fig.3.2 : Influence de la nature du sol sur l'optimum proctor

A noter :

Suivant la teneur en eau du sol compacté par rapport à w_{opt} , on obtient pour les sols fins les perméabilités suivantes :

ω_{faible} : forte perméabilité (1 000 à 10 000 fois plus étanche)

ω_{fort} : faible perméabilité

Cela tient à la structure des argiles, comme le montre la figure ci-contre.

Aux faibles teneurs en eau, les particules d'argile ont une structure floculée, alors qu'aux fortes teneurs en eau les particules sont plus orientées.

Ainsi pour un barrage en terre, on recherche une faible perméabilité et il faut compacter du côté humide. Dans les travaux routiers, on recherche au contraire un sol plutôt perméable, pouvant drainer facilement : on compacte donc côté sec (de la courbe Proctor).

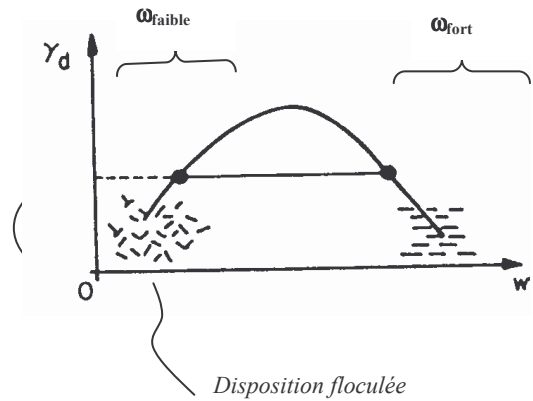


Fig.3.3 : Orientation des flocules selon le compactage

2.3. 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.

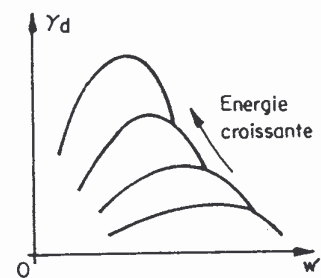


Fig.3.4 : Influence de l'énergie de compactage

2.4. 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 :

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

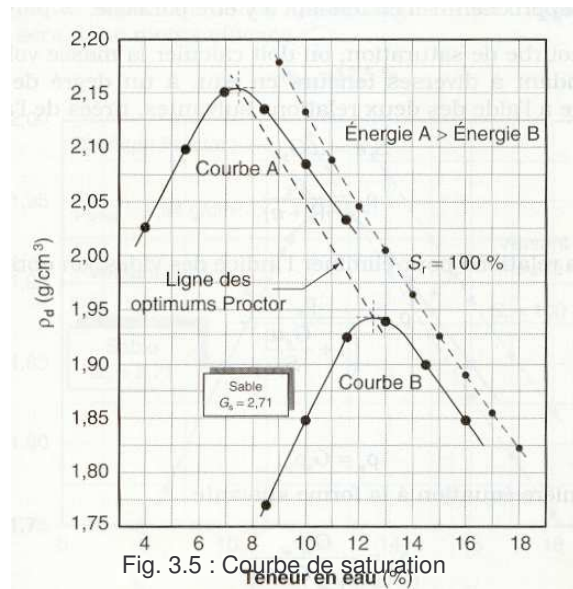


Fig. 3.5 : Courbe de saturation

3. ESSAIS DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE & COMPACTAGE IN SITU

3.1. Essais de laboratoire :

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).

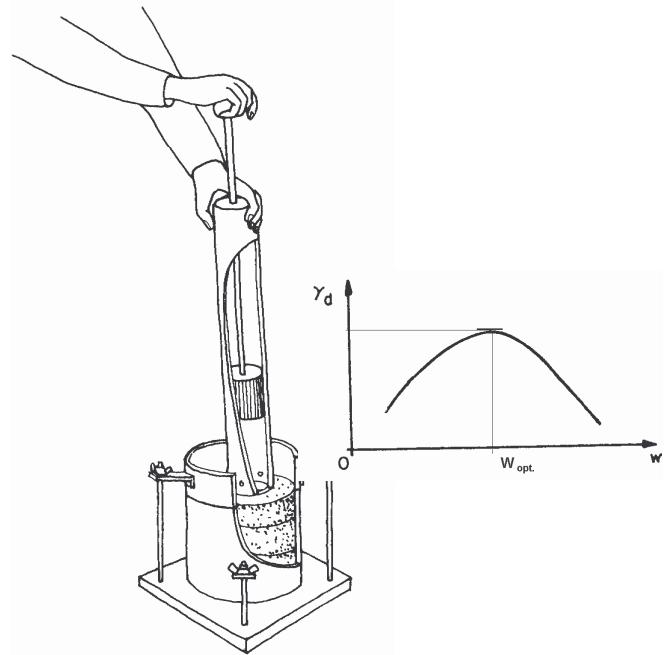


Fig.3.6 : Essai Proctor

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

- Le moule Proctor ($\phi_{\text{moule}} = 101,6 \text{ mm} / H_{\text{de sol}} = 117 \text{ mm}$) 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 ($\phi_{\text{moule}} = 152 \text{ mm} / H_{\text{de sol}} = 152 \text{ mm}$).

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.

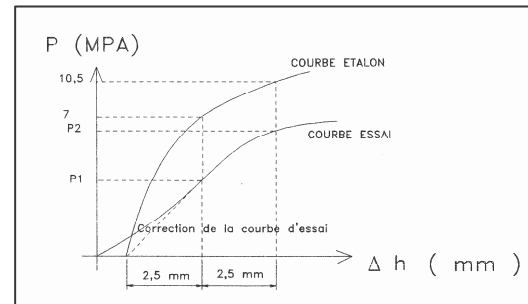
L'Indice Portant Californien est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau à étudier d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part. Il caractérise implicitement la tenu au 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 cm² de section, enfoncé à la vitesse constante de 1,27mm/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 :

$$\frac{\text{Pression à 2,5 mm d'enfoncement}}{0,7}$$
$$\frac{\text{Pression à 5 mm d'enfoncement}}{1,05}$$



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.**

3.1.3. Etude PROTOR -CBR

But : Pouvoir classer les sols suivant leur qualités et leurs possibilités de réemploi. Une telle étude permet d'apprécier les qualités du sol ainsi que son comportement probable au compactage.

Cette étude consiste à compacter le sol à plusieurs teneurs en eau et plusieurs énergies de compactage, et à effectuer un essai CBR. On peut de cette façon tracer les courbes indiquées sur la figure ci-après, qui montrent :

1. Le poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau pour deux énergies de compactage encadrant l'énergie Proctor Normal,
2. Le poids volumique sec γ_d en fonction de la valeur du CBR pour différentes teneur en eau,

3. La valeur du CBR en fonction de la teneur en eau pour chaque énergie de compactage.

Par ailleurs on porte sur ces graphiques la valeur de la teneur en eau naturelle.

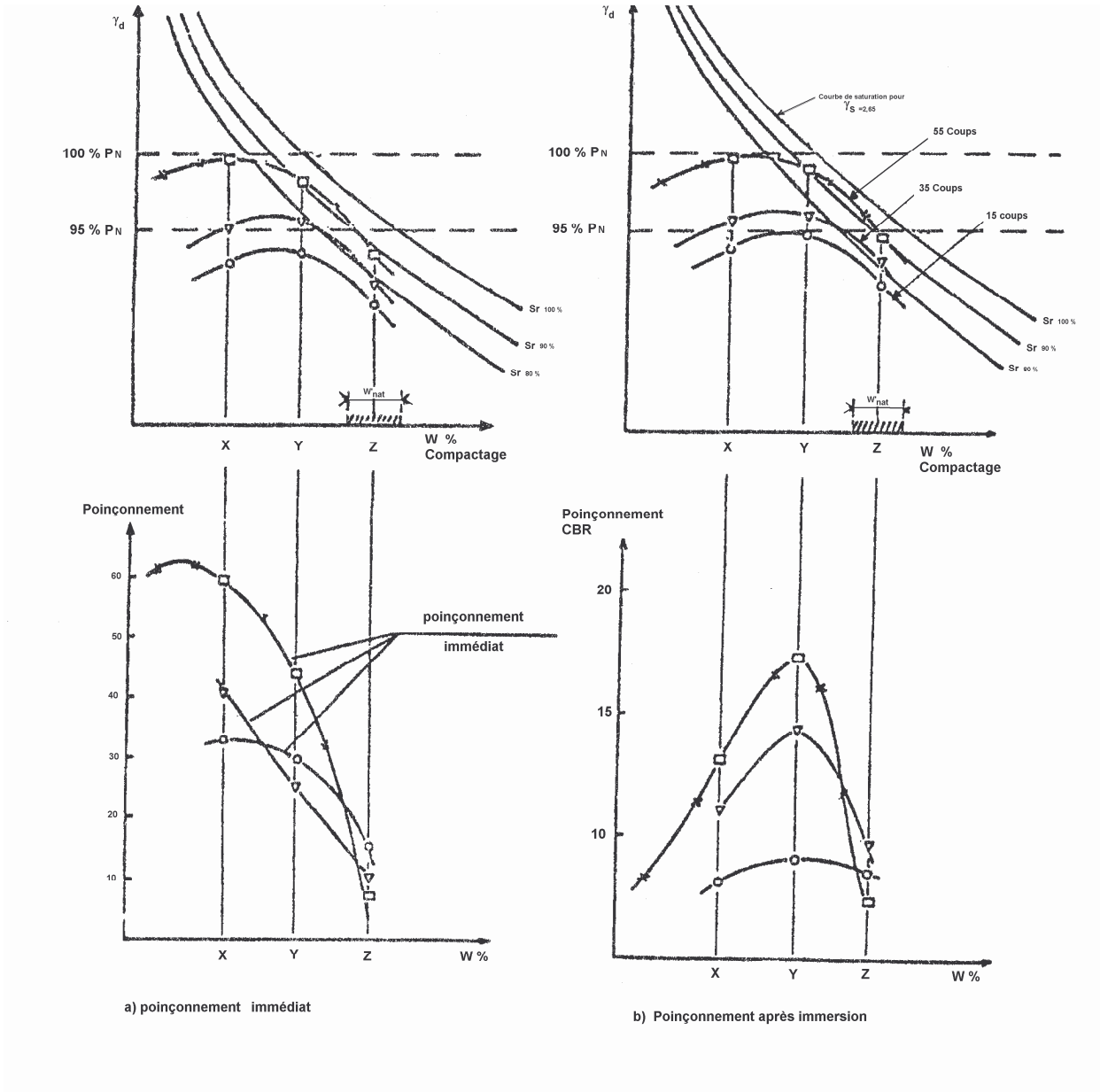


Fig. 3.6 : Etude Proctor-CBR d'un sol

3.2. Compactage in situ

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.

Nous trouverons bien sûr des facteurs propres au terrain compacté (nature, teneur en eau,...) mais aussi des 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).

3.2.1. 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 lié 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).

3.2.2. 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.

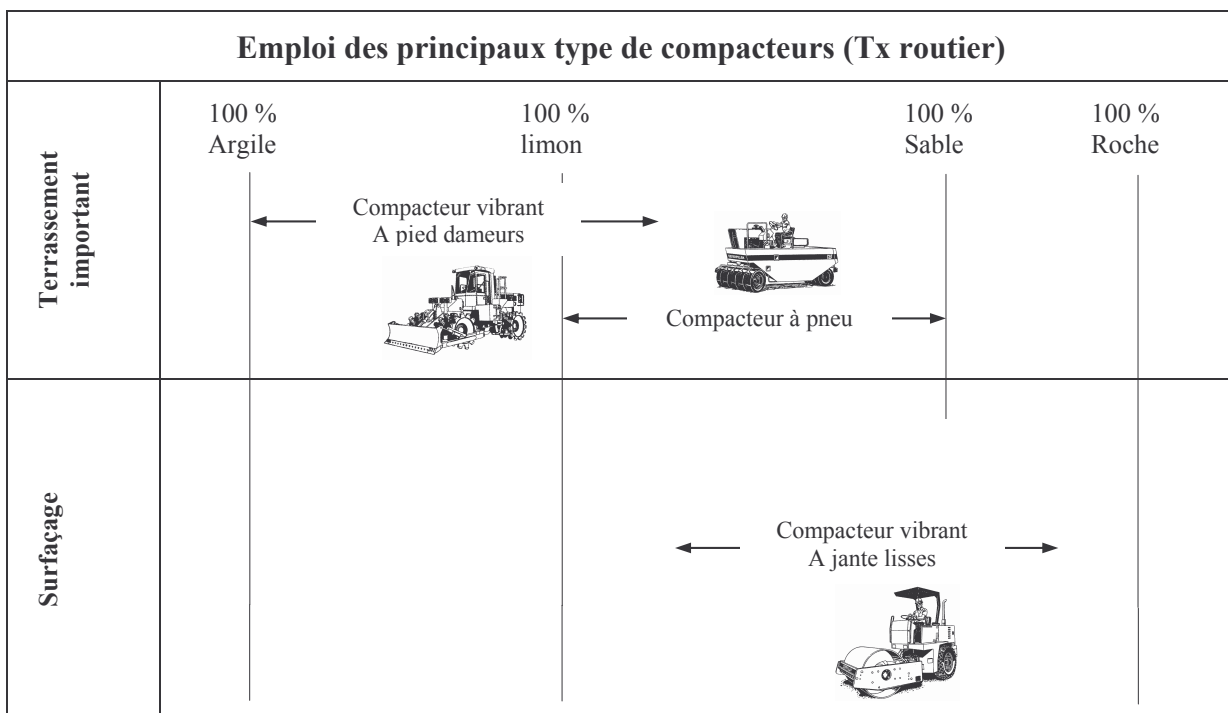


Fig. 3.7 : Domaine d'emploi des principaux engins de compactage (Tx routier)

3.2.3. Influence du nombre de passes

Pour un engin donné et des paramètres de qualité fixés, il existe un nombre de passes optimales fonction de la vitesse de l'engin, 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 le nombre de passe optimale est élevé.

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.

3.2.4. 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 maximale (optimum proctor $\gamma_{d \text{ opt.}}$) on établit le degré de compacité D_c ou pourcentage de compactage à l'aide de l'équation :

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

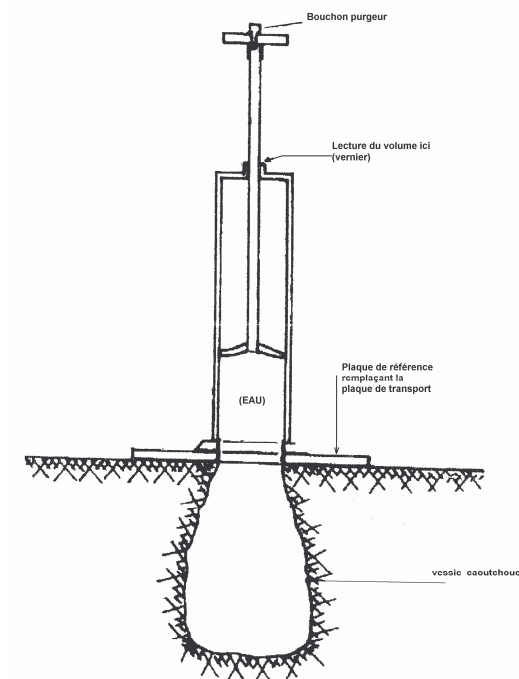
Le degré de compacité est l'un des critères sur lesquels on s'appuie pour accepter ou refuser un compactage. Ce degré qui s'exprime en pourcentage, tend vers 100% lorsque la valeur de $\gamma_{d \text{ chantier}}$ tend vers celle de $\gamma_{d \text{ opt. proctor}}$. En général le cahier des charges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

A Noter : peut-on avoir $D_c = 105\%$?

3.2.4. Densitomètre à membrane

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



Exercice 3.1

Deux échantillons 1 et 2 du même sol (sable limoneux) ont été compactés au même poids volumique sec $\gamma_d = 19,6 \text{ kN/m}^3$ mais à des teneurs en eau respectives $\omega_1 = 4 \%$ et $\omega_2 = 12 \%$. Le poids volumique des particules solides est $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$

- Porter sur un graphique (ω ; γ_d) la courbe de saturation du sol et les points correspondant aux échantillons compactés 1 et 2 (courbe Proctor).
- Déterminer pour chacun d'eux le degré de saturation S_r , et le poids volumique γ .
- L'échantillon 1 ($\omega_1 = 4 \%$) est amené à saturation sans changement de son volume, qui est de 243 cm^3 . Déterminer le volume d'eau nécessaire.

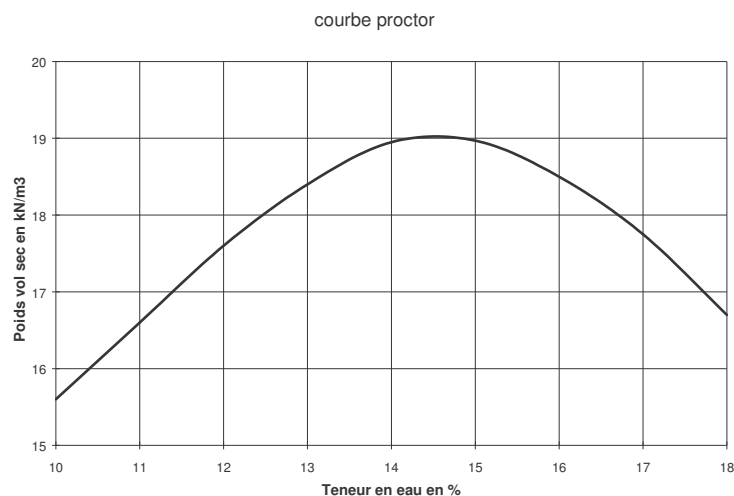
Réponses :

- Courbe Proctor tracée approximativement à partir des deux points
- $S_r = \gamma_s \cdot \omega / (\gamma_w \cdot e)$ avec $e = \gamma_s / \gamma_d - 1$
d'où : échantillon 1 : $S_r = 28,6\%$; $\gamma = 20,4 \text{ kN/m}^3$; Échantillon 2 : $S_r = 85,8\%$; $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$;
- Volume d'eau = $47,8 \text{ cm}^3$

Exercice 3.2

Dans le but de définir les conditions de compactage d'une argile sableuse pour un chantier de remblai routier, des essais Proctor Normal ont été réalisés et ont permis de dresser la courbe ci-dessous (γ_d en fonction de ω).

- Quelle serait la teneur en eau optimale de compactage à adopter ?
- Le matériau a un poids volumique $\gamma = 18,7 \text{ kN/m}^3$ et un poids volumique sec $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$. Déterminer le volume d'eau à ajouter par mètre cube de matériau pour être à l'Optimum Proctor Normal.



Réponses : a) $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$; $\omega = 14,5\%$ b) $\omega = 10\%$; $V_w = 76,5 \text{ litres/m}^3$

4. PROBLEME : Etude d'une couche de fondation d'une piste d'atterrissage d'un aéroport

On veut réaliser la couche de fondation d'une piste d'atterrissage pour des avions gros porteurs. Le matériau utilisé est une latérite dont on se propose de déterminer les caractéristiques Proctor, les paramètres de compactage in-situ ainsi que la quantité de matériaux à prélever à l'emprunt.

Des essais d'identification effectués sur un échantillon de sol prélevé dans un banc d'emprunt de cette latérite ont fourni les résultats suivants :

- Poids volumique de l'échantillon $\gamma = 18 \text{ kN} / \text{m}^3$
- Teneur en eau in situ $\omega = 10\%$
- Poids volumique des constituants solides $\gamma_s = 27 \text{ kN} / \text{m}^3$

Des essais Proctor modifiés réalisés sur un échantillon de ce sol ont fourni les résultats ci-après :

Teneur en eau estimée	9%	10,5%	12%	13,5%	15%
Teneur en eau réelle (%)	9,20	10,60	11,50	12,50	13,97
Poids volumique γ_d sec (kN/m^3)	18,82	19,03	19,17	19,22	18,91

1^{ère} partie : Préliminaires

1) Montrer que la courbe de saturation (pour un degré de saturation S_r quelconque) est donnée par la relation :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\omega \gamma_s}{S_r \gamma_w}}$$

avec : S_r = degré de saturation
 γ_w = poids volumique de l'eau pris égal à $10 \text{ kN}/\text{m}^3$
 ω = teneur en eau
 γ_d = poids volumique sec du sol

- 2) Calculer le poids volumique sec (γ_d) de ce sol in situ
- 3) Calculer la teneur en eau de saturation (ω_{sat}) de ce sol

2^{ème} partie : Interprétation des essais

- 4) Tracer rapidement sur le même graphique :
 - le diagramme Proctor relatif à ce sol
 - les courbes de saturation de 90% et 100%
- 5) En déduire les caractéristiques optimum Proctor (γ_{dopt} et ω_{opt}) pour ce sol
- 6) Calculer le degré de saturation à l'optimum Proctor

3ème Partie : Avant métré

La réalisation de la couche de fondation nécessite la mise en place d'un volume total de remblai $V = 75\,000\text{ m}^3$ de latérite.

Dans toute la suite du problème on admettra les valeurs suivantes :

$$\gamma_d = 16,36\text{ k} / \text{m}^3$$

$$\gamma_{dopt} = 19,23\text{ kN} / \text{m}^3$$

$$\omega_{dopt} = 12,30\%$$

- 7) Déterminer le volume V_0 de sol foisonné à prélever à l'emprunt pour réaliser la totalité de la couche de fondation
- 8) Déterminer le volume d'eau à apporter par m^3 de remblai mis en place pour être à l'optimum Proctor.
- 9) En déduire le volume total d'eau (V_w) nécessaire à la réalisation du remblai.