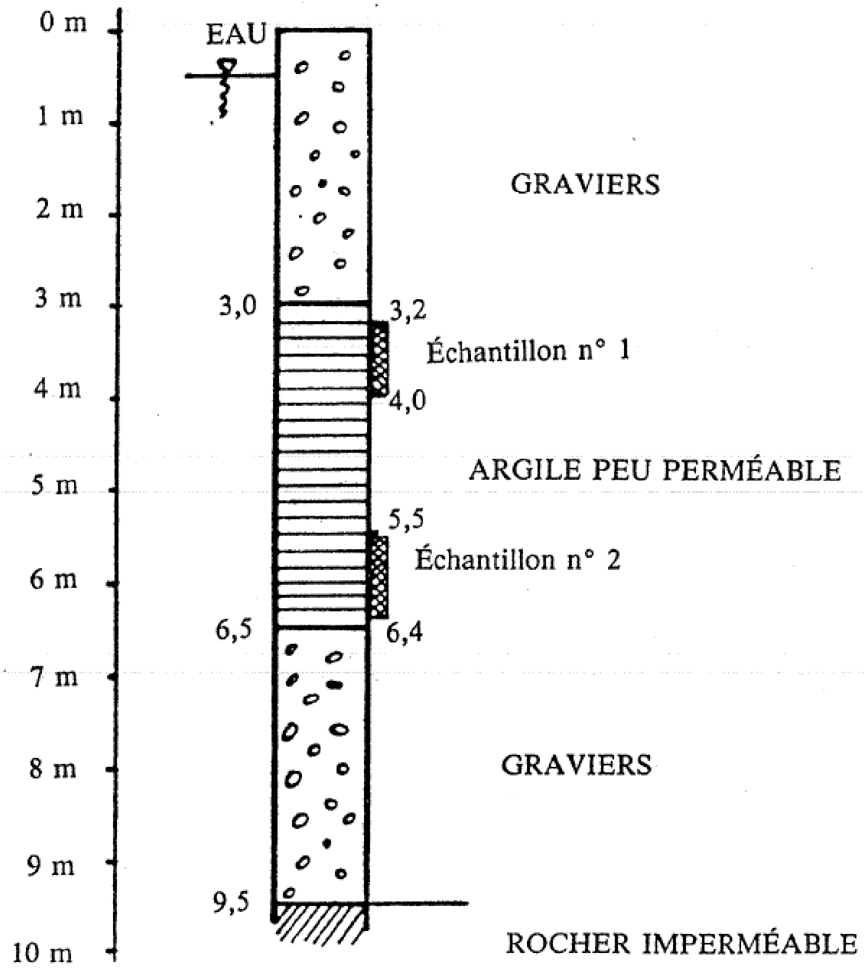
**EXERCICES DE PHYSIQUE DES SOLS**
**SERIE 1**
**PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS**

1) On a réalisé un sondage de reconnaissance[1] dont la coupe est donnée dans la coupe ci-dessous. A l'arrivée des caisses de carottes au laboratoire, on a pris deux échantillons sur lesquels on a fait les mesures usuelles de poids et volume:




| | Echantillon n° 1 | Echantillon n° 2 |
|---|---|---|
| Poids total du sol | 0.48 N | 0.68 N |
| Volume total du sol | $3.10^{-5}$ $m^3$ | $4.3\ 10^{-5}$ $m^3$ |
| Poids sec (après étuvage à 105°C) | 0.30 N | 0.40 N |

Déterminer pour chaque échantillon :

a) le poids volumique et la teneur en eau ; (16 $kN/m^3$, 15.8 $kN/m^3$, 60%, 70%)
b) l'indice des vides, si l'on suppose que le poids volumique des particules solides est égal à 27 $kN/m^3$ ; (1.70 ; 1.90)
c) le degré de saturation dans la même hypothèse ; (95 %, 99 %)
d) la variation relative de volume pendant son prélèvement et son transport au laboratoire, sachant que $\gamma_s$ a été trouvé égal à 27.5 $kN/m^3$. (3.8 %, 1.1 %)

[1] Sondage de reconnaissance : Fréquemment confondu avec forage, le terme sondage s'applique en réalité à tout essai ou mesure réalisé in situ, et par extension, au forage dans lequel est exécuté cet essai ou cette mesure. On parle ainsi de sondage pénétrométrique (= essai de pénétration), de sondage pressiomètrique (=forage équipé d'essais au pressiomètre), de sondage électrique (ce type d'essai ne nécessitant pas de forage préalable

Correction :

On dispose pour chaque échantillon de W, V et $W_s$

a) $\gamma = W/V$ d'où $\gamma_1 = 0.48\ N/3.10^{-5}m^3 = 16\ kN/m^3$ et $\gamma_2 = 115.8\ kN/m^3$
$w = W_w/W_s$ avec $W_w = W-W_s$ donc $W_{w1} = 0.48-0.30 = 0.18\ N$ et $W_{w2} = 0.28\ N$.
d'où $w_1 = 0.18N/0.30N = 0.6 = 60\%$ et $w_2 = 70\%$

b) $e = V_v/V_s$ avec $V_s = W_s/\gamma_s$ donc $V_{s1} = 0.30N/27000N/m^3 = 1.111\ 10^{-5}$ et $V_{s2} = 1.481\ 10^{-5}\ m^3$ et $V_v = V-V_s$ donc $V_{v1} = 1.889\ 10^{-5}\ m^3$ et $V_{v2} = 2.819\ 10^{-5}\ m^3$
d'où $e_1 = 1.889\ 10^{-5}/1.111\ 10^{-5} = 1.70$ et $e_2 = 1.90$

c) $S_r = V_w/V_v$ avec $V_w = W_w/\gamma_w$ donc $V_{w1} = 0.18\ N/10000N/m^3 = 1.8\ 10^{-5}\ m^3$ et $V_{w2} = 2.8\ 10^{-5}\ m^3$
Alors $S_{r1} = 1.8\ 10^{-5}/1.889\ 10^{-5} = 0.95 = 95\%$ et $S_{r2} = 0.99 = 99\%$ donc pour les 2 échantillons recueillis dans la nappe, on a une légère perte de saturation en eau lors du transport au laboratoire

d) Les volumes V considérés jusqu'à présent sont ceux déterminés au laboratoire et sont légèrement supérieurs à ceux in situ qu'on appellera V' à cause de la décompression.
On calcule les valeurs de $V_s$ avec $\gamma_s = 27.5\ kN/m^3$, on trouve $V_{s1} = 1.091\ 10^{-5}\ m^3$ et $V_{s2} = 1.454\ 10^{-5}\ m^3$
Comme les 2 échantillons sont saturés in situ, alors $V' = V_s + V_w$ alors $V'_1 = 2.891\ 10^{-5}\ m^3$ et $V'_2 = 4.254\ 10^{-5}\ m^3$

Ainsi on peut calculer la variation relative de volume par $\Delta V/V' = (V-V')/V'$ d'où $(\Delta V/V')_1 = (3-2.891)/2.891 = 0.0377 = 3.8\%$ et $(\Delta V/V')_2 = 0.011 = 1.1\ \%$.

2) Le prélèvement d'un échantillon intact au centre d'une couche d'argile molle située sous la nappe phréatique [2] a permis de procéder aux mesures suivantes, en laboratoire, sur un morceau de l'échantillon :

| Poids total | Volume total | Poids sec |
|---|---|---|
| 0.47 N | $3.13\ 10^{-5}\ m^3$ | 0.258 N |

a) Déterminer le poids volumique et la teneur en eau. ($15\ kN/m^3$, 82%)
b) Déterminer l'indice des vides. (2.10)
c) Pour vérifier la saturation du sol, on mesure le poids volumique des particules solides, $=27\ kN/m^3$. Calculer le degré de saturation. (97.7%)

Correction :

a) $\gamma = W/V = 0.47\ N/3.13\ 10^{-5}\ m^3 = 15\ kN/m^3$
$w = W_w/W_s$ avec $W_w = W-W_s = 0.47-0.258 = 0.212\ N$ d'où $w = 0.821 = 82\ \%$
b) $e = V_v / V_s$ or l'échantillon ayant été prélevé dans la nappe phréatique, il est saturé donc $V_v = V_w = W_w/\gamma_w = 0.212N/10000N/m^3 = 2.12\ 10^{-5}\ m^3$ et $V_s = V-V_v = 3.13\ 10^{-5} - 2.12\ 10^{-5} = 1.01\ 10^{-5}\ m^3$
d'où $e = 2.12\ 10^{-5}/1.01\ 10^{-5} = 2.099 = 2.10$
c) On peut déterminer $V_s = W_s/\gamma_s = 0.258N/27000\ N/m^3 = 0.96\ 10^{-5}\ m^3$ donc $V_v = V-V_s = 2.17\ 10^{-5}\ m^3$ d'où $S_r = V_w/V_v = 2.12\ 10^{-5}/2.17\ 10^{-5} = 0.9769 = 97.7\%$

3) On connaît pour un sol :
- le poids volumique = $14\ kN/m^3$

[2] Nappe phréatique : première nappe pérenne rencontrée sous la surface du sol, et qui alimente les sources et les puits.

- la teneur en eau = 40%
- le poids volumique des particules solides = 27 kN/m$^3$

Calculer alors le poids volumique sec (10 kN/m$^3$), le degré de saturation (64%), l'indice des Vides (1.7), la porosité (0.63), le poids volumique saturé ainsi que le poids volumique déjaugé.

Correction :

On utilise le tableau du cours donnant les relations entre les paramètres du sol.

La relation 16 : $\gamma = \gamma_d (1+w)$ donne $\gamma_d = \gamma/(1+w) = 14/(1+0.4) = 10$ kN/m$^3$
La relation 12 : $w = S_r\ \gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$ donne $S_r = 0.64 = 64\%$
La relation 7 : $e = \gamma_s/\gamma_d - 1 = 1.7$
La relation 2 : $n = e/(1+e) = 0.63$
La relation 17 : $\gamma = \gamma_d + nS_r\, \gamma_w$ donne (avec $S_r = 1$) $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w = 16.3$ kN/m$^3$
La relation 23 : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 6.3$ kN/m$^3$

4) Un échantillon de sol saturé prélevé sous le niveau de la nappe phréatique[2] a pour poids volumique égal à 20 kN/m$^3$. Au dessus du toit de la nappe, le même sol a un poids volumique de 18 kN/m$^3$. Calculer son degré de saturation sachant que le poids volumique des particules solides vaut 27 kN/m$^3$. (51%)

Correction :

Evidemment il s'agit de déterminer le degré de saturation du sol au dessus de la nappe (au Dessous , le degré de saturation est 100 %). On dispose pour le même sol de $\gamma_{sat} = 20$ kN/m$^3$, $\gamma = 18$ kN/m$^3$, $\gamma_s = 27$ kN/m$^3$. La relation 8 permet de calculer l'indice des vides (il est le même au dessus et au dessous de la nappe) $e = (\gamma_s - \gamma_{sat})/(\gamma_{sat} - \gamma_w) = 0.7$. Ensuite la relation 20 par exemple permet de déterminer $S_r = 51$ %.

6) Le creusement d'une tranchée de drainage [33] a permis de mettre à jour deux couches d'argile dont les caractéristiques sont les suivantes :

(1) $w_L$=72%, $w_P$=37% et w= 65%

(2) $w_L$=72%, $w_P$=35% et w= 30%

a- Calculer les indices de plasticité, de consistance et de liquidité des deux couches. Qu'en concluez-vous quant à leurs propriétés ? ($I_{c1} = 0.2$, $I_{c2} = 1.14$)

Le remblaiement de cette tranchée a nécessité la mise en place d'un poids sec de 49,5 kN d'un matériau ayant en place un volume de 3 m$^3$. Le poids volumique des grains solides est égal à 27 kN/m$^3$. Déterminer :

b- la quantité d'eau nécessaire pour saturer les 3 m$^3$ de remblai (1.17 m$^3$)

c- l'indice des vides et la teneur en eau de ce sol à saturation (0.64, 24%)

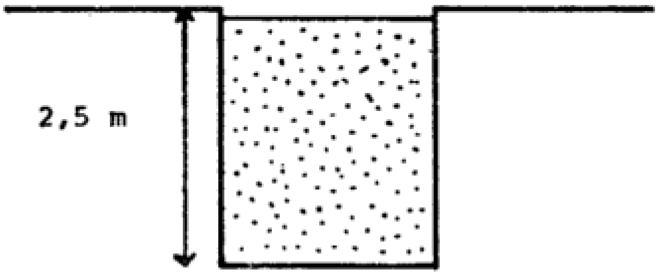
[3] Tranchée de drainage : tranchée remblayée avec un matériau perméable formant filtre vis-à-vis du train encaissant (ou protégé par un filtre artificiel : géotextile), destinée à assainir un sol ou un ouvrage, en éliminant l'eau du sol par gravité.

d- la valeur du poids volumique du sol à saturation (20.4 kN/$m^3$)

L'indice des vides vaut au maximum 0,9 et au minimum 0,4

e- Calculer l'indice de densité du matériau. Dans quel état de compacité se trouve ce remblai ? (52%, moyennement dense)

f- Par compactage en masse de ce sol, mis en remblai sur une hauteur de 2.5 m, on obtient un accroissement de l'indice de densité de 0.2. De combien a tassé, par compactage, la surface du remblai si l'on suppose qu'il ne s'est produit aucune déformation latérale ? (15 cm)




Correction :

a- $I_p = w_L - w_P$ donc $I_{p1}$= 35 et $I_{p2}$ = 37
Ic= $(w_L - w)/I_p$ donc $I_{c1}$= 0.2 et $I_{c2}$= 1.14
$I_L = (w-w_P)/I_p$ ou $I_L = 1-I_c$ donc $I_{L1}$= 0.8 et $I_{L2}$ = -0.14
L'échantillon 1 est très mou et l'échantillon 2 est très consistant.

b- $W_s$= 49.5 kN, V = 3 $m^3$, $\gamma_s$ = 27 kN/$m^3$ alors on peut determiner $V_s = W_s/\gamma_s$ =1.83 $m^3$ d'où $V_v = V-V_s$ = 1.17 $m^3$. La quantité (en volume) nécessaire pour saturer le remblai est donc $V_w = V_v$ = 1.17 $m^3$

c- $e = V_v/V_s$ = 1.17/1.83= 0.64 et $w=W_w/W_s$ avec $W_w = \gamma_w V_w$=11.7 kN d'où w= 0.236=24%

d- $\gamma$ =W/V avec W= $W_s + W_w$ = 61.2 kN et V= 3 $m^3$ d'où $\gamma$ = 20.4 kN/$m^3$

e- $I_D = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$= 0.52 donc état moyennement dense.

f- Soit H (=2.5 m) la hauteur initiale du remblai, S sa section et V (3 $m^3$) son volume. On a alors S= V/H= 1.2 $m^2$. Si H'est la hauteur finale et V' le volume final, on a V'= H'S (S reste constante car pas de déformation latérale). On doit déterminer le tassement $\Delta$H= H-H'.

On dispose de $\Delta I_D = I_D' - I_D$ donc $I_D' = I_D + \Delta I_D$ = 0.52+0.2=0.72 donc on trouve l'indice des vides final e' en utilisant $I_D' = (e_{max} - e')/(e_{max} - e_{min})$ d'où e'= 0.54
On a $V = V_s + V_v = V_s + eV_s = (1+e)V_s$ et $V' = (1+e')V_s$ alors V'/V= (1+e')/(1+e) soit H'/H= (1+e')/(1+e)= 0.94 ou H'= 2.35m
Finalement le tassement est 2.5-2.35= 0.15 m= 15 cm.

7) Dans l'identification de dix échantillons de sol, le laboratoire a commis des erreurs. Les déterminer :

Echantillon n° 1: w = 30%, $\gamma_d$ = 14.9 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 27 kN/m$^3$
Echantillon n° 2: w = 20%, $\gamma_d$ = 18 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 27 kN/m$^3$
Echantillon n° 3: w = 10%, $\gamma_d$ = 16 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 26 kN/m$^3$
Echantillon n° 4: w = 22%, $\gamma_d$ = 17.3 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 28 kN/m$^3$
Echantillon n° 5: w = 22%, $\gamma_d$ = 18 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 27 kN/m$^3$
Echantillon n° 6: w = 95%, $\gamma_d$ = 7.2 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 23 kN/m$^3$
Echantillon n° 7: w = 3%, $\gamma_d$ = 14 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 28 kN/m$^3$
Echantillon n° 8: w = 20%, $\gamma_d$ = 17 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 28 kN/m$^3$
Echantillon n° 9: w = 15%, $\gamma_d$ = 17 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 20 kN/m$^3$
Echantillon n° 10: w = 50%, $\gamma_d$ = 11.5 kN/m$^3$, $\gamma_s$ = 27 kN/m$^3$
(Erreur si $w>w_{sat}$, c'est à dire pour 2, 5, 9.)

Corrigé :

Pour tous les échantillons, la donnée de $\gamma_d$ et de $\gamma_s$ permet de déterminer la teneur en eau $w_{sat}$ par la relation 12 avec Sr=1

[12] $\mathbf{w} = \mathbf{S_r} \cdot \gamma_w \cdot \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$

Evidement on doit avoir $w \leq w_{sat}$
Donc erreur si $w>w_{sat}$ c'est-à-dire pour 2,5 et 9.

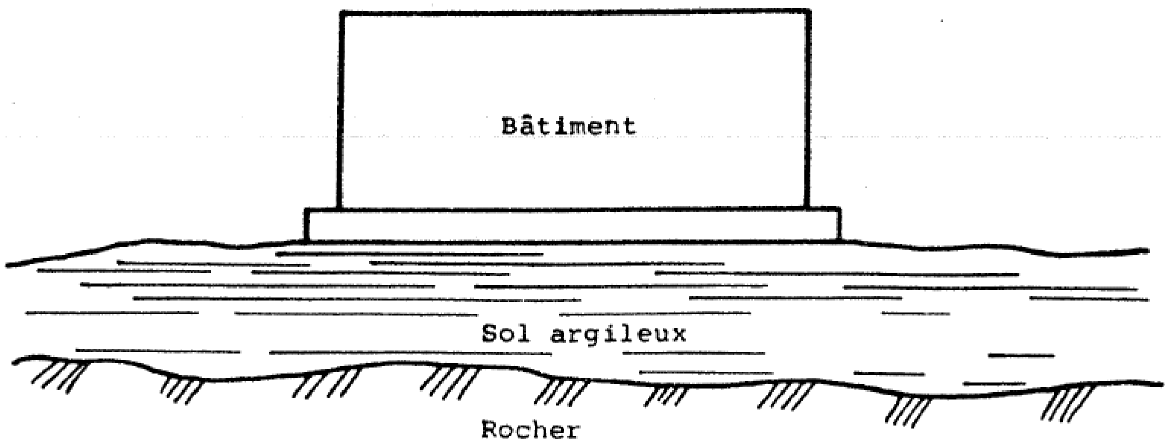
8) On considère un bâtiment industriel fondé sur un radier de fondation reposant sur une couche de sol argileux saturé de 2.5 m d'épaisseur (figure ci-après). Les caractéristiques initiales de cette couche sont :

| Poids volumique | Teneur en eau | Poids volumique des grains |
|---|---|---|
| $\gamma_1$ = 19.5 kN/m$^3$ | $w_1$ = 29.2 % | $\gamma_s$ = 27 kN/m$^3$ |

Par suite de l'exécution de la construction, la compacité de la couche augmente et les caractéristiques finales sont :

| Poids volumique | Teneur en eau |
|---|---|
| $\gamma_2$ = 19.9 kN/m$^3$ | $w_2$ = 26.6 % |

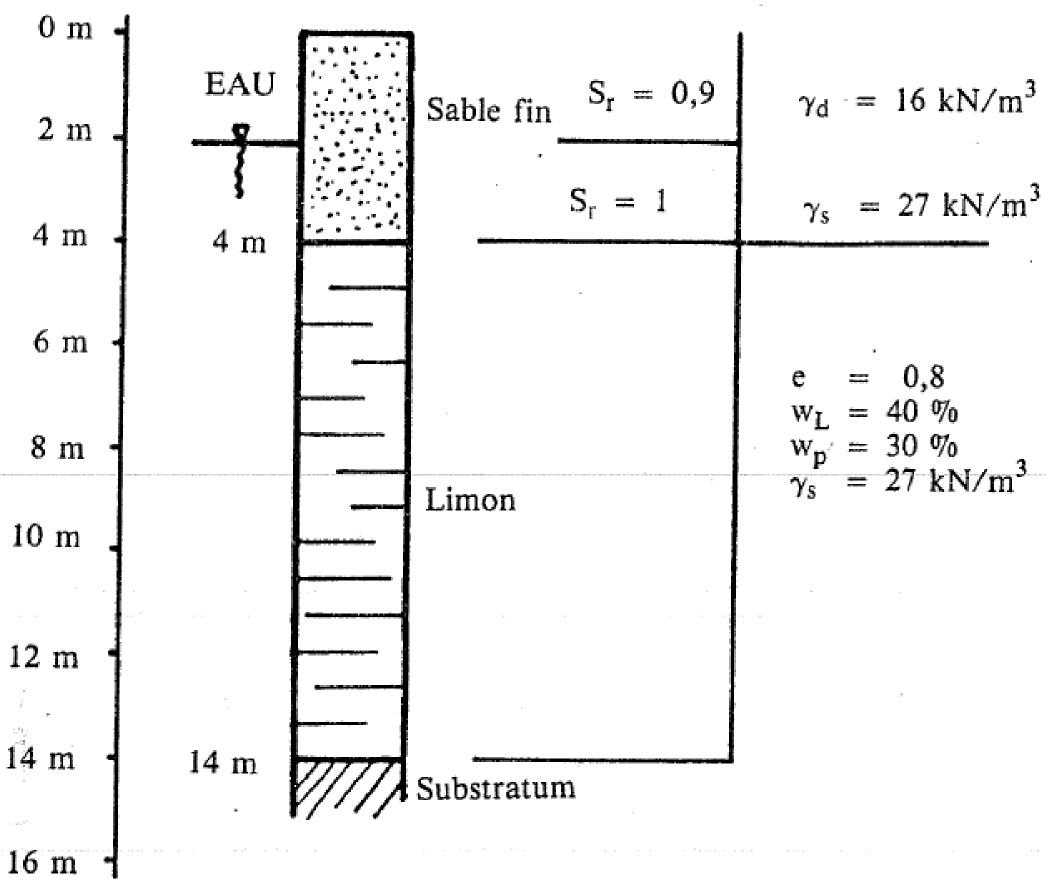
Déterminer le tassement du radier en supposant qu'il n'y a aucune déformation latérale du sol autour du radier, sachant qu'on trouve le rocher au-dessous de la couche de sol argileux (10 cm)



Corrigé :

On considère le volume de sol directement sous le radier. Comme il n'y a aucune déformation latérale, la section horizontale S reste constante ainsi que $W_s$. On a avant déformation $V_1 = H_1S$ avec $H_1 = 2.5$ m et après déformation $V_2 = H_2S$ d'où $W_1 = \gamma_1 V_1 = W_s + W_{w1} = W_s + w_1 W_s = (1+w_1)W_s$ ou $\gamma_1 H_1 S = (1+w_1)W_s$ (1)
De même $\gamma_2 H_2 S = (1+w_2) W_s$ (2). En divisant (2) par (1) : $H_2/H_1 = (1+w_2)\gamma_2/(1+w_1)\gamma_1$
En remplaçant, on obtient $H_2 = 2.4$ m d'où un tassement $H_1 - H_2 = 0.1$ m= 10 cm.

9) Sur les échantillons d'un sondage les poids volumiques du sable fin et du limon et l'indice de plasticité du limon




Déduire de ces données les poids volumiques du sable fin et du limon et l'indice de plasticité du limon ainsi que sa dénomination géotechnique LCPC. ($\gamma_{\text{sable hors nappe}}$=19.7 kN/m$^3$, $\gamma_{\text{sable sous nappe}}$= 20.1 kN/m$^3$, $\gamma_{\text{limon}}$= 19.4 kN/m$^3$, $I_p$=10, limon peu plastique $L_p$)

Une partie du sable fin est sous la nappe donc saturé (Sr =1), une autre partie est hors nappe avec Sr =0 (due à une saturation partielle par capillarité). La relation

[12] $$w = S_r \cdot \gamma_w \cdot \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

Permet de déterminer la teneur en eau w dans chaque cas et ensuite d'en déduire le poids volumique par la relation 16 :

[16] $$\gamma = (1 + w) \cdot \gamma_d$$

Pour Sr= 0.9, w= 0.23 puis $\gamma$ = 19.7 kN/m$^3$

Pour Sr = 1, w= 0.255 puis $\gamma$=20.1 kN/m$^3$

Pour le limon (situé dans la nappe donc saturé), on a e et $\gamma_s$, on utilise alors la relation 8 qui donne $\gamma_{sat}$ :

[8] $$e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$$

D'où $\gamma_{sat}$ = 19.4 kN/m$^3$.

S'agissant de limon donc de sol fin, on utilise le diagramme de Casagrande pour déterminer sa dénomination géotechnique. Comme $w_L$ = 40 et $w_P$ = 30, donc $I_p$= 10, il s'agit de limon peu plastique $L_p$.