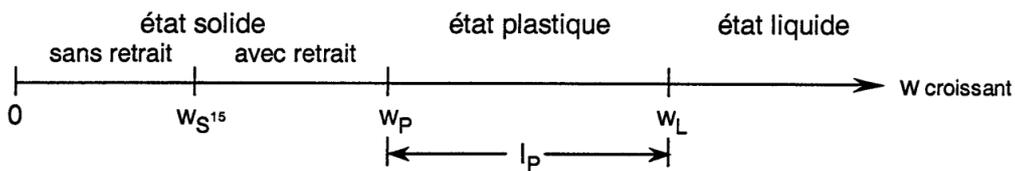


# TP n°1

## Mesure des paramètres de consistance (Limites d'Atterberg)

Un sol peut exister dans trois états principaux : solide, plastique et liquide. Ces états dépendent de la teneur en eau du sol. La transition d'un état à un autre est marquée par une valeur de la teneur en eau. Cette valeur définit une limite qui distingue entre deux états d'un sol. Il existe au total trois limites appelées limites d'Atterberg :

- limite de solidité (ou de retrait)  $w_s$  - limite de plasticité  $w_p$  - limite de liquidité  $w_L$



Pour caractériser la consistance d'un sol, il suffit de comparer sa teneur en eau réelle avec ces limites.

On définit les coefficients caractéristiques suivants :

- Indice de plasticité : mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique, il est calculé par :

$$I_p = w_L - w_p$$

$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

- Indice de liquidité :

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

- Indice de consistance : caractérise l'état de compacité d'un sol

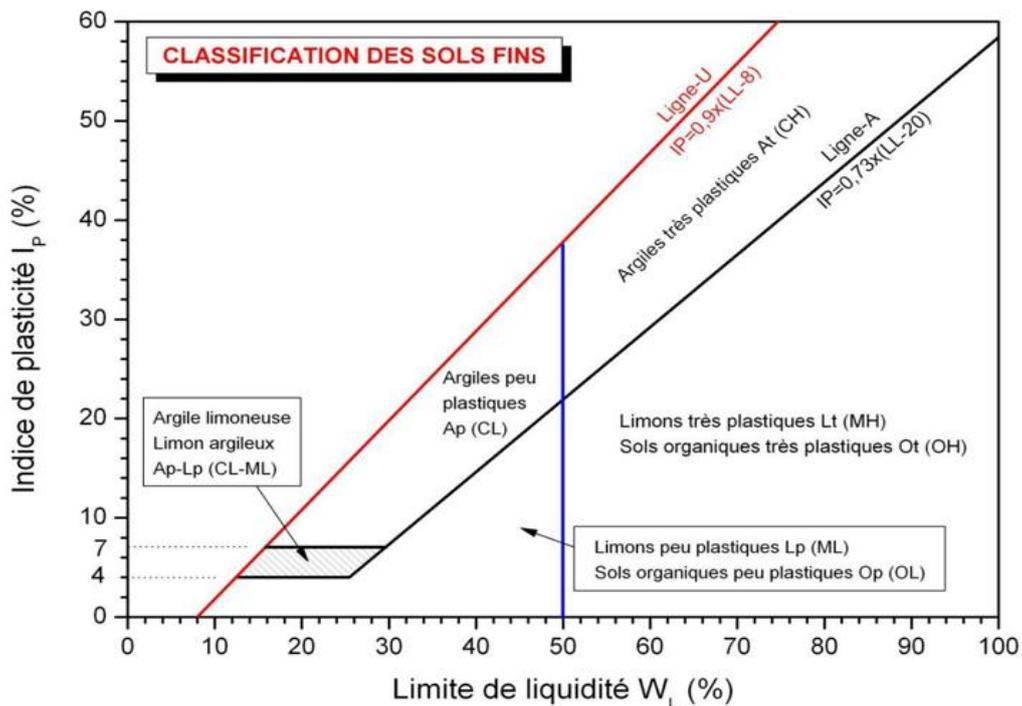
$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

Indice de consistance	consistance du sol
$I_c \leq 0$	Liquide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$	Solide ou semi solide.

### But de l'essai :

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments fins ou argileux d'un sol. La détermination des limites d'Atterberg qualifiera la fraction argileuse existante dans un échantillon de sol (Indice de plasticité  $I_p$ ).

Les résultats ainsi obtenus vont servir pour classifier ce sol, en utilisant l'abaque de Casagrande – Diagramme de plasticité suivant :



### Objectif de la manipulation :

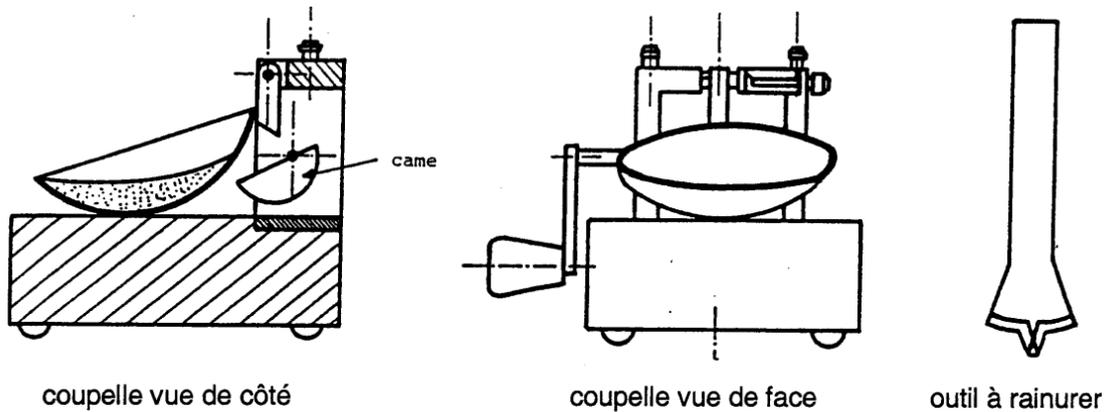
- Suivre le mode opératoire des essais afin de déterminer les limites d'Atterberg.
- Calculer les différents paramètres liés aux essais
- Identifier le sol en utilisant l'abaque de Casagrande.

### 1- Détermination de la limite de liquidité $w_L$ :

#### Équipements nécessaires :

- Appareil de Casagrande.

- Outil à rainurer
- Spatule
- Une cale de 10 mm pour le réglage de la hauteur de chute de la coupelle
- Tamis de 0,4 mm d'ouverture.
- Balance.
- Étuve réglable à 105°



### Mode opératoire :

- Tamiser un échantillon de sol au diamètre 0,4 mm.
- Peser une quantité de 150 à 200 g de cette fraction
- Ajouter une quantité d'eau au sol et malaxer jusqu'à obtenir une pâte homogène.
- À l'aide de la spatule, étaler une partie de la pâte dans la coupelle de l'appareil de Casagrande (L'épaisseur au centre est de 15 à 20 mm)
- Tracer une rainure le long du milieu de la coupelle à l'aide de l'outil à rainurer.
- Soumettre la coupelle à des chocs répétés à un rythme régulier (avec une cadence de 2 coups par seconde) et compter le nombre de coups.
- Arrêter les chocs lorsque les deux parties se rejoignent et la rainure se ferme sur une longueur de 1 cm, et noter le nombre de coups N correspondant.
- Prélever un échantillon de la pâte au voisinage de l'endroit où la rainure s'est fermée et déterminer ensuite sa teneur en eau.
- Reprendre les opérations précédentes et réaliser au minimum 3 autres mesures pour des teneurs en eau différentes.
- Entre deux essais, nettoyer la coupelle à l'eau.

### Remarque :

- Les essais à répéter doivent porter sur des teneurs en eau différentes de façon à avoir 4 ou 5 mesures avec des nombres de coups répartis comme suit : 15-20 ; 20-25 ; 25-30 ; 30-35.
- Si le nombre de chocs est inférieur à 15, sécher un peu.
- Si le nombre de chocs est supérieur à 35, humidifier légèrement et homogénéiser l'échantillon avant de reprendre l'essai.

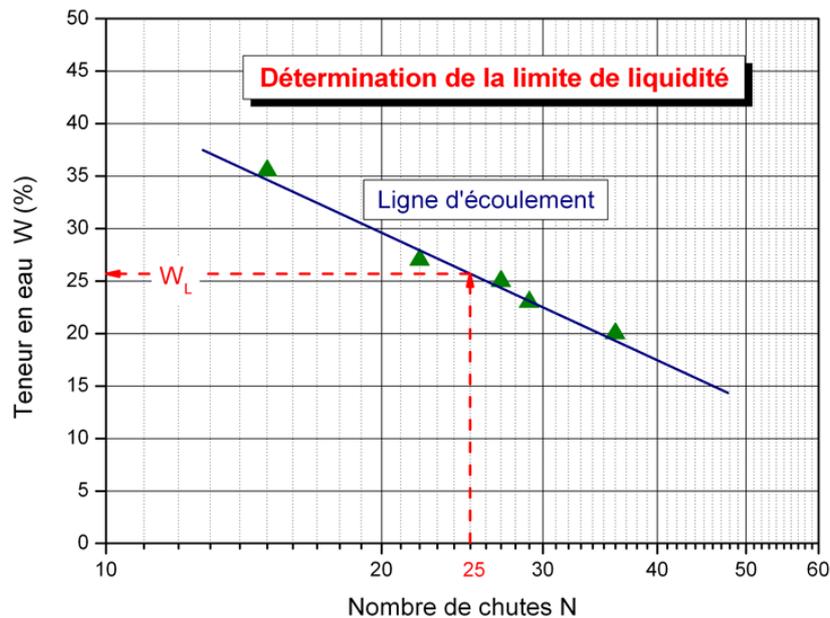


### Interprétation des résultats :

La limite de liquidité  $w_L$  est, par définition, **la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 coups**. Afin de déterminer cette valeur, on rapporte les résultats de l'essai sur un graphique semi-logarithmique.

On effectue environ 4 à 5 mesures à différentes teneurs en eau et à un nombre de chocs qui varie entre 15 et 35. Puis, on trace la droite  $w = f(\log N)$

La limite de liquidité est égale à la teneur en eau correspondant à un nombre de chocs de 25 :



On peut déterminer approximativement  $w_L$  à partir d'un seul essai à l'aide de l'équation proposée par Casagrande :

$$w_L = w_N * \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan(\beta)} \quad \text{avec } \tan(\beta) = 0,121$$

Où  $w_N$  est la teneur en eau nécessitant N chocs pour fermer la rainure sur une longueur de 1 cm.

Cette formule permet d'estimer la limite de liquidité à partir d'un seul essai, à condition que le nombre de coups N soit entre 15 et 35.

## 2- Détermination de la limite de plasticité $w_p$ :

### Équipements nécessaires :

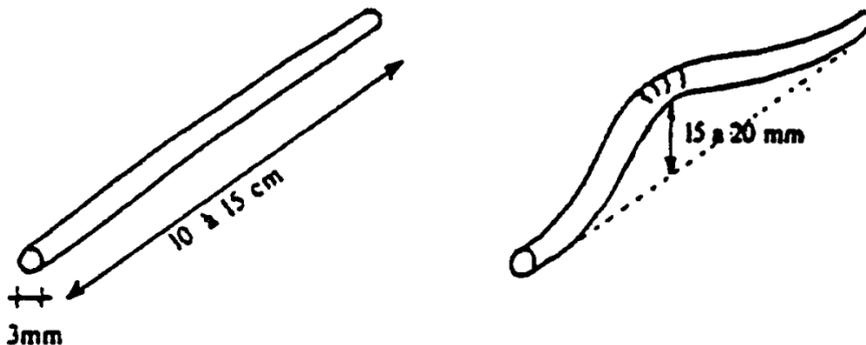
- Plaque de marbre
- Des tares à masses connues.
- Balance.
- Étuve

### Mode opératoire :

- Prendre un peu de matériau et former une boule.
- Sur la plaque de marbre, rouler la boulette à la main afin d'obtenir un bâtonnet de 3mm de diamètre et de 10 cm de longueur.

Trois cas peuvent se présenter :

- 1- Le bâtonnet commence à se fissurer quand il atteint une longueur de **10 cm** et un diamètre de **3 mm**.
- 2- Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
- 3- Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu.



Lorsque le premier cas est vérifié, c'est-à-dire que l'échantillon se brise ou se fissure lorsqu'il atteint une longueur de 10 cm sur un diamètre de 3mm, on conclut que le sol est à la limite de plasticité.

On récupère ainsi un échantillon du bâtonnet et on mesure sa teneur en eau.

L'essai est répété une deuxième fois afin de réduire la marge d'erreur et d'obtenir une valeur moyenne des deux mesures.

### Interprétation des résultats :

La limite de plasticité est, par définition, la teneur en eau correspondant à un rouleau du matériau qui se brise en tronçons lorsqu'on le fait amincir, en atteignant un diamètre de 3 mm.

**Remarque :**

- Si aucune fissuration n'apparaît, ça veut dire que l'échantillon est encore très plastique et sa teneur en eau est supérieure à sa limite de plasticité. On réintègre le rouleau à la boulette initiale et on malaxe le tout pour sécher un peu avant de former un nouveau rouleau et de reprendre l'essai.
- Si les valeurs trouvées s'écartent de plus de 2%, on répète l'essai.

**Travail demandé :**

1- Réaliser 3 à 5 mesures de la limite de liquidité :

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
<b>N° de la tare</b>					
<b>Poids de la tare (g)</b>					
<b>Poids total humide (g)</b>					
<b>Poids total sec (g)</b>					
<b>Teneur en eau (%)</b>					
<b>Nombre de coups N</b>					

- 2- Tracer la courbe  $w = f(N)$
- 3- Déduire la limite de liquidité
- 4- Réaliser deux essais de la limite de plasticité

	Essai 1	Essai 2
<b>N° de la tare</b>		
<b>Poids de la tare (g)</b>		
<b>Poids total humide <math>M_H</math>(g)</b>		
<b>Poids total sec <math>M_s</math> (g)</b>		
<b>Teneur en eau (%)</b>		

- 5- Calculer la teneur en eau des deux essais et calculer la moyenne =  $w_p$
- 6- Calculer l'indice de plasticité de l'échantillon.
- 7- Classer le matériau à partir de l'abaque de Casagrande.

## TP n°2 Essai Proctor

### Préambule et objectif :

Dans la réalisation des remblais, une entreprise organise une campagne d'essais sur plusieurs types de sols afin d'en déterminer les caractéristiques physiques. L'objectif de ces paramètres est de choisir le sol le plus adéquat qui présente les meilleures conditions naturelles.

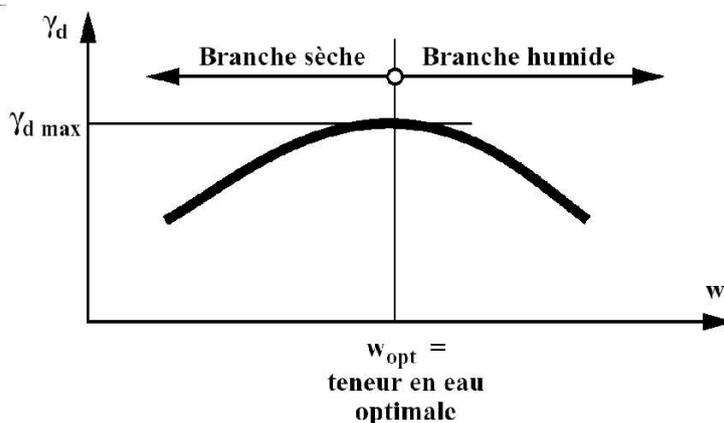
L'exécution des remblais, par la suite, repose sur ce choix de sol ainsi que la technique de mise en œuvre principale : Le compactage.

Le compactage est fonction de la nature du sol, c'est-à-dire de ses paramètres intrinsèques. Pour assurer un bon compactage du remblai, le sol doit contenir une certaine quantité d'eau et doit présenter un poids volumique sec optimal.

De ce vient l'objectif du présent essai : Proctor a montré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue. L'essai donc consiste à simuler la technique du compactage au laboratoire afin de déterminer la teneur en eau optimale que doit contenir le sol à tester afin d'assurer une bonne mise en œuvre sur chantier.

### Principe de l'essai :

L'essai Proctor 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. On réalise plusieurs mesures pour un sol humidifié à différentes teneurs en eau, puis on trace la courbe Proctor ;  $\gamma_d = f(w)$  :



La forme générale de la courbe présente une valeur maximale du poids volumique sec  $\gamma_d$  qui correspond à une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimale de compactage.

On distingue deux types d'essais :

- Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié.

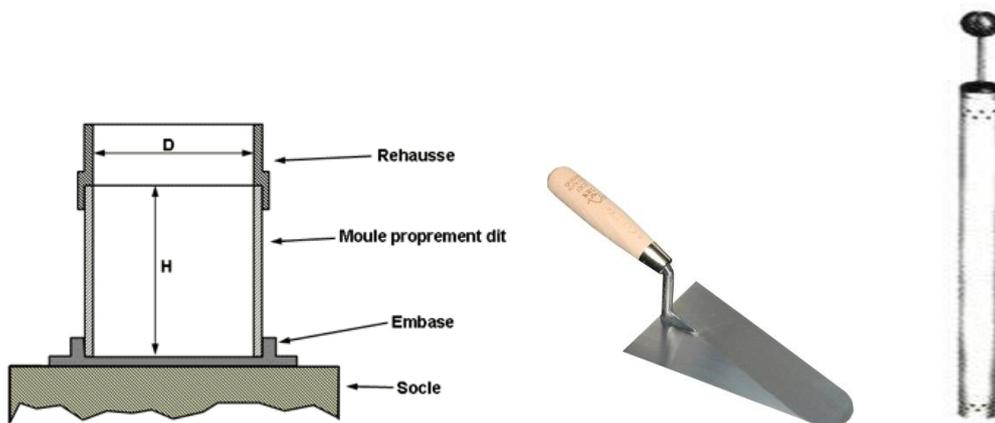
Les deux essais sont identiques dans leur principe, la différence réside dans l'énergie de compactage appliquée au sol.

L'essai *Proctor Normal* est réalisé pour des projets de construction des remblais de grande masse (barrages, fondations, digues...).

L'essai *Proctor Modifié*, réalisé avec une énergie de compactage supérieure, est utilisé pour les sols nécessitant un sol plus dense et plus résistant, comme les infrastructures routières, aéroports...

### Équipements nécessaires :

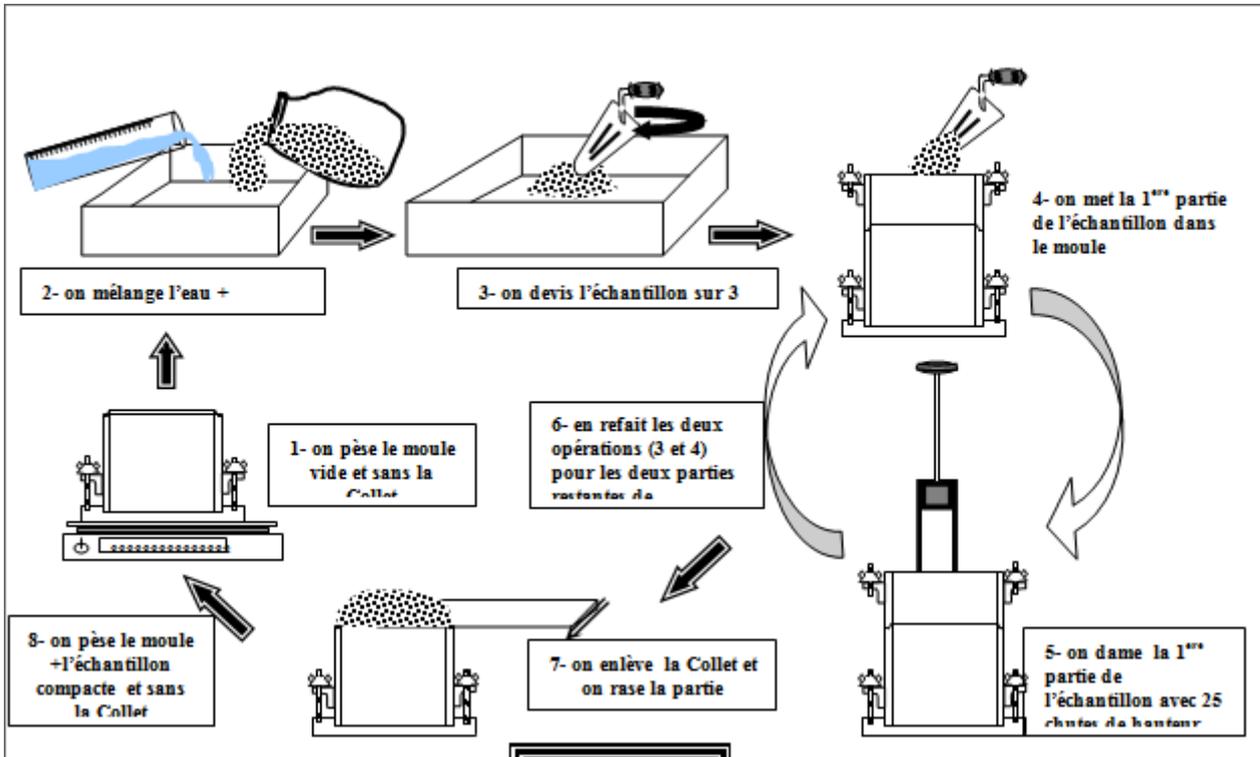
- Moule Proctor (Normal ou CBR) avec embase et rehausse.
- La dame de compactage (Normal ou Modifié)
- Bac d'homogénéisation pour le malaxage
- Tamis 20 mm.
- Éprouvette graduée
- Truelle
- Règle à araser.
- Balance.
- Étuve pour la mesure de la teneur en eau.



### Mode opératoire :

- Préparer 5 échantillons de 2 kg de sable chacun, tamisées à 20 mm.
- Le premier essai sera réalisé avec la teneur en eau naturelle du sol. Le deuxième essai, on ajoute 2% d'eau (50 g pour 2,5kg de sol) et ainsi de suite à raison de 2% (4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%) selon l'humidité apparente du sol.
- Dans un bac d'homogénéisation, et à l'aide de la truelle, on malaxe bien le sol.
- Le moule Proctor est monté, puis pesé à vide : **P1**.
- L'échantillon est réparti en 3 couches.
- Introduire la première couche de sol dans le moule.
- Utiliser la dame pour compacter la première couche, en appliquant respectivement 25 coups dispersés équitablement sur la surface supérieure de la couche.
- Répéter la même procédure pour les deux autres couches.
- Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse. Le matériau doit dépasser la hauteur du moule par 1 cm au maximum.
- L'excédent est arasé soigneusement par la règle, du centre vers la périphérie. Si le départ des éléments >10 mm laisse des vides à la surface supérieure, combler ces vides par des particules fines du même échantillon et compacter à la main et lisser avec la règle.

- Peser l'ensemble du moule avec le matériau : **P2**.
- Démouler l'éprouvette
- Extraire deux échantillons représentatifs (une prise en partie haute et une prise en partie basse de l'éprouvette) pour en déterminer la teneur en eau.



**Expression des résultats :**

Le poids volumique sec est obtenu par la formule :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$

Avec :  $\gamma = \frac{P_2 - P_1}{V}$

V : Volume du moule Proctor (**V = 948 cm<sup>3</sup>**)

$\omega$  : Teneur en eau du sol compacté.

**Travail demandé :**

- 1- Réaliser entre 3 et 5 essais Proctor en suivant les étapes indiquées dans le mode opératoire, et remplir le tableau suivant :

Teneur en eau (%)	0%	4%	6%	8%	10%
Poids du moule P1 (g)					
Poids moule + échantillon P2 (g)					
Poids échantillon P2-P1 (g)					
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )					
Poids volumique humide $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )					
Teneur en eau mesurée w(%)					
Poids volumique sec $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )					

- 2- Tracer la courbe Proctor et déterminer le couple ( $\omega_{opt}, \gamma_{d,opt}$ )  
 3- Déterminer le degré de saturation Sr à l'optimum