

## L'essai Proctor

### Introduction :

Afin de pouvoir choisir un matériau apte à la réalisation d'un remblai, une entreprise organise une campagne d'essais pour déterminer les caractéristiques physiques de plusieurs types de sols. Pour ce faire des essais sont réalisés, in situ sur des plates-formes tests, et, en laboratoire. Une équipe a été chargée d'une première campagne d'essais sur un sol de granulométrie 0/20 (référéncé sol A) et vous transmet les résultats que vous êtes chargés d'exploiter.

Vous disposez de plus d'un échantillon d'un autre sol (référéncé sol B). Vous décidez de réaliser (afin de compléter votre rapport) les essais de laboratoire suivants :

- Un essai Proctor Normal et détermination du poids spécifique.

### Principe

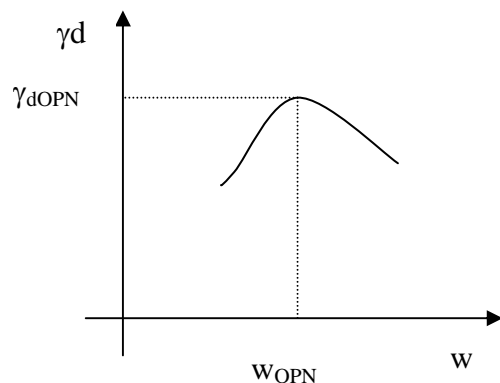
L'ingénieur américain Proctor a montré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue.

L'essai 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 :  $w_{OPN}$  (ou  $w_{OPM}$  suivant le cas).
- La densité sèche maximum correspondante  $\gamma_d$  ( $\gamma_{dOPN}$  OU  $\gamma_{dOPM}$ )

### Nota :

- OPN : Optimal Proctor Normal
- OPM : Optimal Proctor Modifié



### Intérêt en Génie Civil

La teneur en eau d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement. Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, il est nécessaire de déterminer la valeur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité.

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 la destination de l'ouvrage. Elle est imposée par les C.C.T.P.

On distingue :

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

# L'essai Proctor

## ✂ Matériel nécessaire :

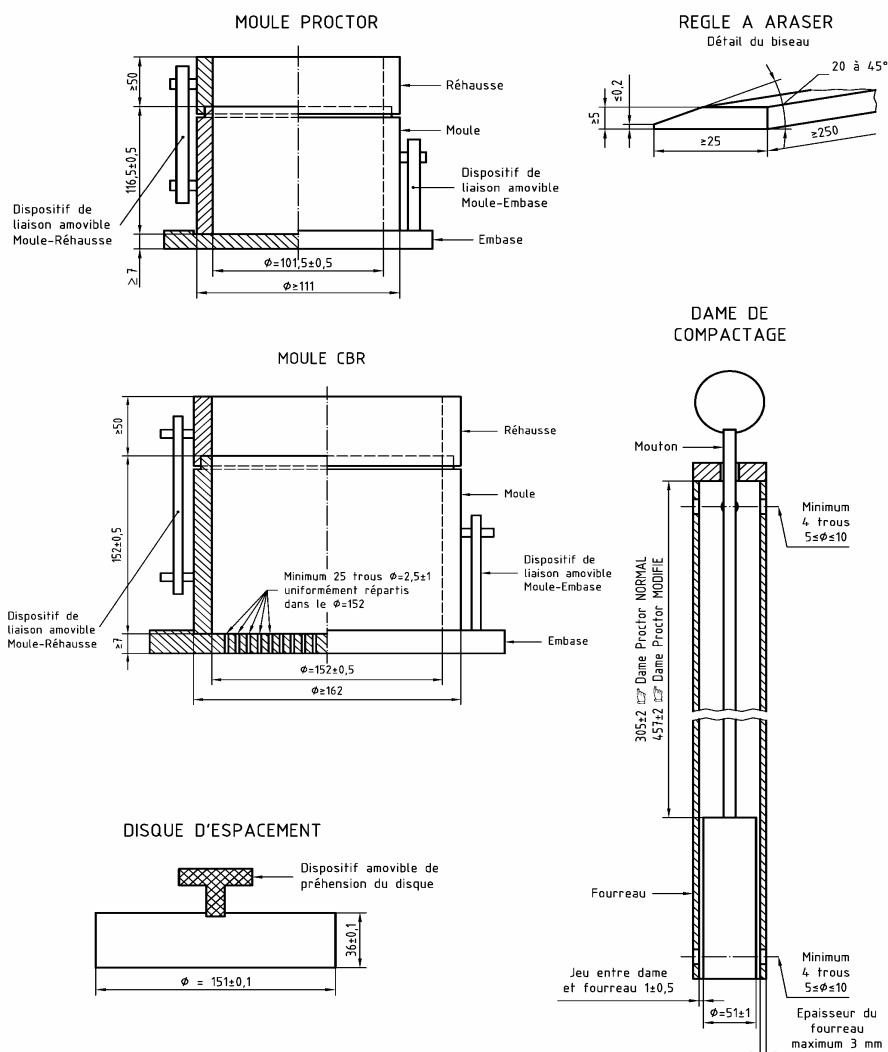
- un **socle de compactage** constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm × 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm ;
- **deux modèles de moules** :
  - moule Proctor ;
  - moule CBR.

Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu.

Le moule CBR comporte en plus un disque d'espacement.

- **deux modèles de dames de compactage manuelles** :
  - la dame dite «dame Proctor normal» est constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm ± 1 mm de diamètre.
  - la dame dite «dame Proctor modifié» est de conception analogue à la «dame Proctor normal» mais la hauteur de chute est de 457 mm ± 2 mm et la masse de l'équipage mobile de 4 535 g ± 5 g.
- **une règle à araser** constituée par une lame en acier dont les formes et les dimensions doivent être conformes aux indications portées ci-dessous.

Dimensions en millimètres



**L'essai Proctor**

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;
- balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux ;
- matériels et outillages divers.

**⚙ Matériau utilisé :**

- un échantillon de sol de 15 kg

**📖 Documents à consulter :**

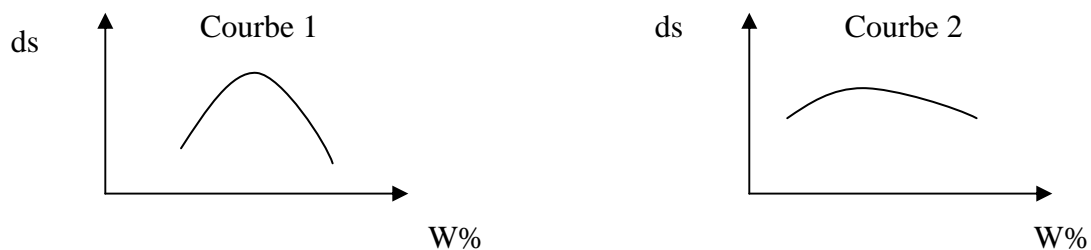
- norme NF P 94-093 (Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié)

**Travail demandé****I / MANIPULATIONS****1.1- Essais sur le sol B en utilisant l'annexe N°1:( Document réponse N°4)**

- 1.1.1  $\Rightarrow$  Calculer la quantité d'eau à rajouter à l'échantillon de sol B humide de manière à porter sa teneur en eau à **7%**.
- 1.1.2  $\Rightarrow$  Après avoir humidifier à 7% l'échantillon de sol, réaliser l'essai **Proctor Normal** et déterminer :
- La teneur en eau exacte de l'échantillon.
  - La masse volumique apparente sèche  $\rho_{dB}$
- 1.1.3  $\Rightarrow$  Procéder à la détermination expérimentale de la masse volumique absolue  $\rho_{dB}$ . (annexe N°2).

**2/ TRAVAIL EN SALLE****2.1- L'essai Proctor:**

- 2.1.1-  $\Rightarrow$  Quelles différences y a-t-il entre les essais « Proctor Normal » et « Proctor Modifié » ?
- 2.1.2-  $\Rightarrow$  Commenter les allures des courbes Proctor suivantes :

**2.2- Etude expérimentale du sol B**

- 2.2.1-  $\Rightarrow$  A partir de vos premiers résultats concernant le sol B, pouvez-vous vous prononcer quant à l'utilisation de ce matériau en tant que remblai ? Justifier votre réponse.

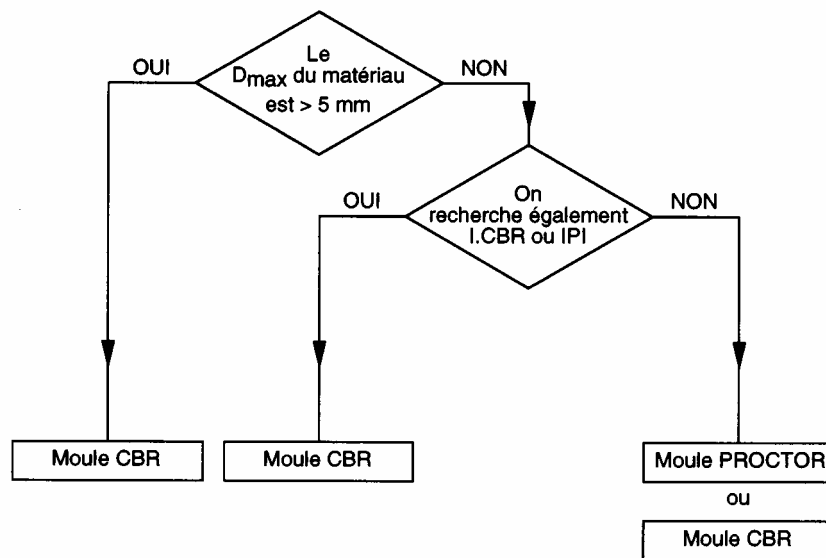
**Travail demandé****2.3- Fiche d'essai du sol A :**

- 2.3.1- ⇨ Analyser les essais réalisés du document réponse N°2.  
⇨ Parmi ces essais, lequel permet de contrôler le compactage; expliquer son principe.
- 2.3.2- Exploiter les résultats de l'essai Proctor Modifié du document réponse N°1.  
⇨ Tracer la courbe correspondante ( $d_s = f(w\%)$ ) sur le document réponse N°3.  
⇨ Déduire de la courbe obtenue (répondre sur le document réponse N°1):
- la teneur en eau optimale Proctor modifié :  $W_{OPM}\%$ .
  - la densité sèche apparente optimale Proctor modifié :  $d_{sOPM}$
- 2.3.3- ⇨ Exploiter les résultats du contrôle de compactage du document réponse N°2.  
⇨ En déduire le taux de compactage atteint (**en % de l'O.P.M**) sur le document réponse N°1.  
⇨ En déduire les Paramètres d'états demandés sur le document réponse N°2.
- 2.3.4- ⇨ Sachant que la plate forme réalisée avec le matériau A doit respecter un taux minimum de compactage de **98% de l'O.P.M**, indiquer par une couleur sur le graphique du document réponse N°3, la zone répondant a cette exigence. Vérifier si ce taux de compactage est bien respecté.
- 2.3.5- ⇨ Que proposeriez-vous si le matériau se trouve dans un état trop **sec** ou trop **humide** au moment de l'utilisation ?
- 2.3.6- ⇨ Citer d'autres essais permettant de contrôler le compactage d'un remblai.

## Mode opératoire

**- Choix du type de moule :**

Il est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme ci dessous :

**- Choix de l'énergie de compactage :** (en fonction des stipulations du C.C.T.P)

- **Essai Proctor normal :** (remblais, ouvrages en terre, couches de forme)
- **Essai Proctor modifié :** (couche de chaussées)

Les choix du type de moule, de la dame et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées.

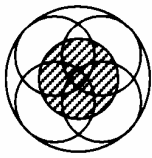
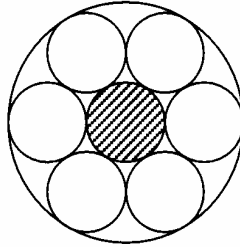
- 1- Solidariser : moule, embase et rehausse ;
- 2- Lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- 3- Placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
- 4- Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié.



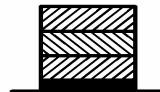



- **les quantités à prévoir de matériau par essai sont :**

- Moule Proctor = **2500g**
- Moule C.B.R = **5500g**

## Annexe N°1

- 5- Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 coups ou 56 coups par couche suivant le schéma suivant, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.

	<p>Par couche : trois séquences de huit coups répartis, et le 25<sup>e</sup> au centre</p>		<p>Par couche : huit séquences de sept coups, six approximativement tangents à la périphérie et le 7<sup>e</sup> au centre</p>
<b>Moule Proctor</b>		<b>Moule CBR</b>	

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>25 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Dame Proctor normal</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>56 coups par couche</p>  <p>Moule CBR</p> </div> </div>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>25 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Dame Proctor modifié</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>56 coups par couche</p>  <p>Moule CBR</p> </div> </div>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

- 6- Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser.

- 7- Peser l'ensemble du moule avec le matériau :

**NOTA** : Attention, si on prévoit la détermination des Indices CBR et/ou de l'Indice Portant Immédiat, vous devez vous référer à la norme NFP 94-093 (mode opératoire).

## Annexe N°1

8- on procède au démoulage de l'éprouvette. En extraire, ensuite, deux échantillons représentatifs (une prise en partie haute et une prise en partie basse de l'éprouvette) pour en déterminer la teneur en eau.

**NOTA :** Particularités applicables aux **matériaux traités** avec de la **chaux et/ou un liant hydraulique** (voir la norme NF P 94-093).

### Expression des résultats :

- Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

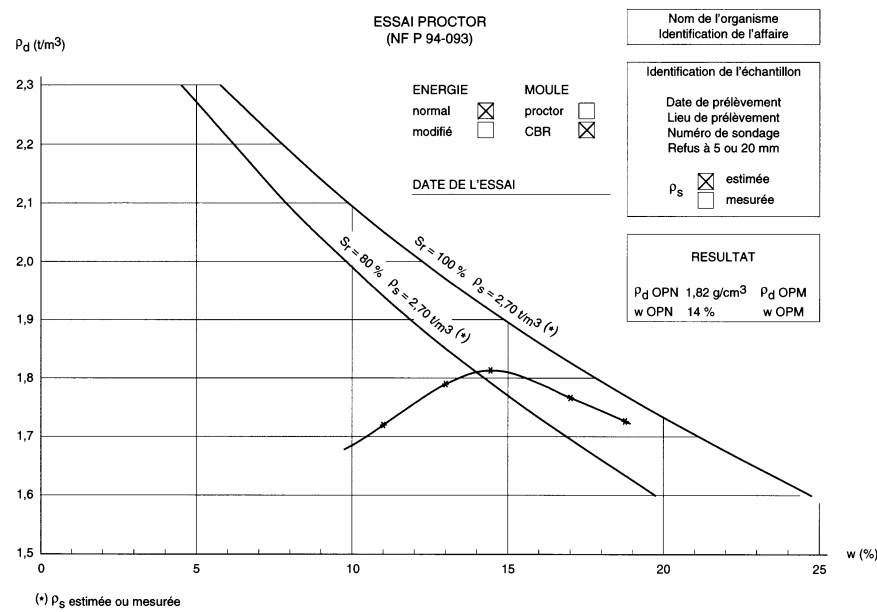
- la teneur en eau ;
- la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
- la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé.

- Courbe Proctor :

- On reporte les couples ( $w$  ;  $\gamma_d$ ) sur le graphe et on ajuste la courbe sur les points obtenus ;
- On en déduit les valeurs de  $\gamma_d$  maximum et de  $w$  optimum. ( $\gamma_d$  exprimée à 0,01 t/m<sup>3</sup> près et  $w$  à 0,1% près).

- Courbe de saturation :

- voir la norme NF P 94-093 (Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié : expression des résultats)





## Masse spécifique $\rho_s$ ou Masse volumique absolue d'un sol

### Mode opératoire

#### *Utilisation d'une éprouvette*

- placer l'éprouvette dans le bac en plastique
- verser de l'eau dans l'éprouvette (demi hauteur) et noter V1
- préparer un échantillon de granulats secs de masse M1( environ 300 g)
- verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur
- noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure
- renouveler l'opération **2 fois**

#### *Utilisation d'un pycnomètre*

- verser de l'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère et déterminer M1 (pycnomètre essuyé)
- vider une partie du pycnomètre et déterminer m2
- préparer un échantillon de granulats secs ( 50 g environ)
- verser l'échantillon dans le pycnomètre à l'aide de la main écope et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur. Noter la nouvelle masse m'2
- compléter le niveau d'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère. Noter la nouvelle masse M3
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure
- renouveler l'opération **2 fois**

### Résultats

#### Utilisation d'une éprouvette :

La masse spécifique =  $\rho_s$  ou masse volumique absolue est donnée par:

$$\rho_s = \frac{M1}{V2 - V1} \quad \rho_s \text{ en g/cm}^3 \text{ ou kg/dm}^3 \text{ ou t/m}^3$$

#### Utilisation d'un pycnomètre :

On pose:  $M2 = m'2 - m2 =$  masse de granulats secs introduits dans le pycnomètre  
 $M = M1 + M2 - M3 =$  masse de l'eau "supprimée" par l'introduction du granulat

La masse volumique de l'eau étant sensiblement égale à  $1\text{g/cm}^3$  à température ambiante, on a:  $V \approx M$

$$\rho_s = \frac{M2}{V} \quad \rho_s \text{ en g/cm}^3 \text{ ou kg/dm}^3 \text{ ou t/m}^3$$

## Document réponse N°1

Fiche d'essai du sol AEssai Proctor (PM – Moule C.B.R)

Densité Apparente Sèche		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
Masse du sol humide	<b>Mh (kg)</b>	4,001	4,298	4,799	4,977	4,871	4,404
Masse du sol sec	<b>Ms (kg)</b>	3,859	4,112	4,511	4,573	4,426	3,944
Teneur en eau	<b>W %</b>						
Volume du moule	<b>V (dm<sup>3</sup>)</b>	2,297	2,297	2,297	2,297	2,297	2,297
Masse Vol. sèche	<b><math>\rho_d</math> (kg/dm<sup>3</sup>)</b>						
Densité sèche apparente	<b><math>d_s</math> (SU)</b>						

Teneur en eau optimale Proctor modifié :

 $W_{OPM}\%$  =

Densité sèche apparente optimale Proctor modifié:

 $d_{sOPM}$  =

Densité sèche apparente du sol A compacté :

 $d_{sA}$  =

Taux de compactage atteint en % de l'OPM :

 $TC_{OPM}\%$  =

## Document réponse N°2

Essais réalisés sur le sol A compacté**Contrôle au densitomètre à membrane:**

Masse de sol prélevé	<b>P (g)</b>	4456,6
Volume initial	<b>V1 (cm3)</b>	136
Volume final	<b>V2 (cm3)</b>	2230
Masse Vol. humide	<b>MVapp (kg/dm3)</b>	

**Contrôle de la teneur en eau naturelle:**

		Point 1	Point 2
Masse du sol humide	<b>Mth (g)</b>	263,000	287,000
Masse du sol sec	<b>Mts (g)</b>	254,400	276,600
Tare (contenant)	<b>T (g)</b>	130,000	130,000
Teneur en eau	<b>W%</b>		

Teneur en eau moyenne <b>W%=</b>	
----------------------------------	--

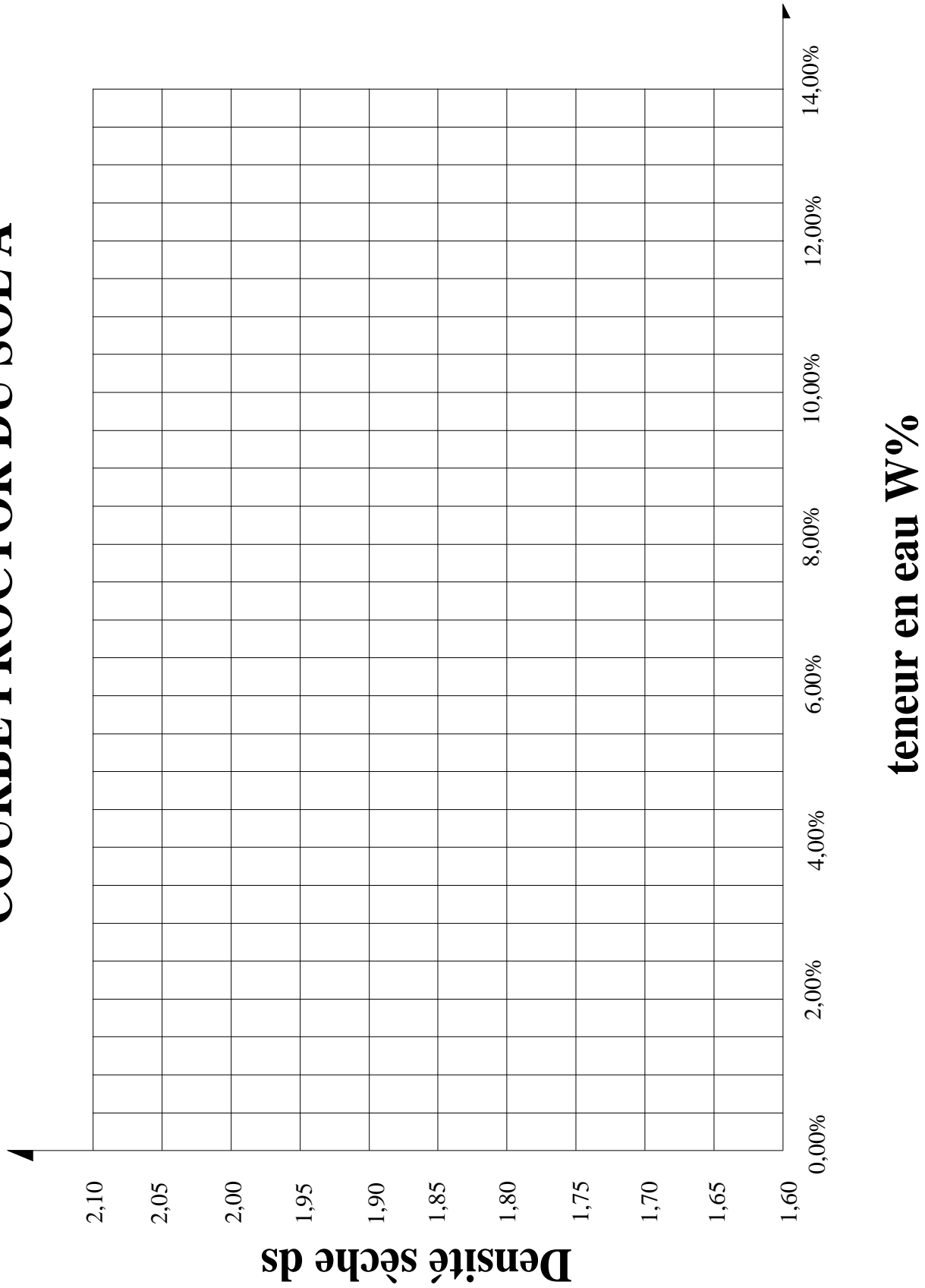
**Contrôle au Pycnomètre sur échantillon sec du sol A:**

		Point 1	Point 2
Pycno. Vide	<b>M1 (g)</b>	345	345
Pycno. + sol	<b>M2 (g)</b>	595	715
Pycno. + sol + eau	<b>M3 (g)</b>	1657	1733,5
Pycno. Plein d'eau	<b>M4 (g)</b>	1500	1500
Masse Vol. absolue	<b>MVabs (kg/dm3)</b>		

Masse Volumique Absolue Moyenne: <b>Mvabs (kg/dm3) =</b>	
--	--

**PARAMETRES D'ETATS DU SOL A**

Poids Volumique apparent du sol en place	$\gamma$	<b>kN/m3</b>
Teneur en eau de ce remblai	<b>W%</b>	
Poids Volumique apparent sec	$\gamma_d$	<b>kN/m3</b>
Poids Volumique absolu	$\gamma_s$	<b>kN/m3</b>
Degré de saturation	<b>Sr%</b>	
Compacité	<b>C</b>	
Porosité	<b>n</b>	
Teneur en eau de saturation	<b>Wsat%</b>	

**COURBE PROCTOR DU SOL A**

## Document réponse N°4

Fiche d'essai du sol B1)- Essai Proctor Normal sur l'échantillon humide du sol B :

Préparation de l'échantillon	
Quantité d'eau à ajouter pour amener la teneur en eau à $w=7\%$	

Masse Volumique			1	
	Masse totale humide	Mth en g		
	Masse du moule vide	Mts en g		
	Volume du moule	V en dm <sup>3</sup>		
	Masse nette du sol humide			
Teneur en eau			1	2
	Masse totale humide	Mth (g)		
	Masse totale sèche	Mts (g)		
	Tare	M0 (g)		
	Masse de l'eau	Me		
	Masse du sol sec	Ms		
	Teneur en eau	Wi%		
	Teneur en eau moyenne	W%		
Masse Volumique sèche en kg/dm <sup>3</sup>		MVapp		
Densité sèche (SU)		ds		

2)- Essai au pycnomètre sur l'échantillon sec du sol B :

	1	2
M1 en g		
M2 en g		
M3 en g		
M4 en g		
Masse Volumique Absolue		
Masse Volumique Absolue Moyenne	Kg/m <sup>3</sup>	