

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2015

Toute documentation permise  
Calculatrices : modèles autorisés seulement  
Durée de l'examen : 3 heures

**14-AE-A1      PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DES SOLS**

L'examen porte sur l'aménagement d'une exploitation agricole et les comporte 4 parties indépendantes suivantes :

- Partie I : Propriétés des sols
- Partie II : Tassements
- Partie III : Résistance
- Partie IV : Compactage

Les 4 parties possèdent la même pondération et peuvent être traitées dans l'ordre souhaité.

En cas d'erreur ou d'incohérence dans les données de l'énoncé, les candidats sont invités à **inscrire clairement leurs hypothèses** et à poursuivre la résolution de l'examen.

L'examen comporte 6 pages incluant celle-ci.

## AMÉNAGEMENT D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE

Dans le cadre de l'aménagement d'une exploitation agricole, il est prévu de construire un silo pour le stockage de blé, ainsi qu'une voie d'accès pour les engins agricoles.

Au droit du site, le sol est composé d'une couche de sable de 2 m d'épaisseur reposant sur une couche d'argile normalement consolidée de 8 m d'épaisseur. Le substratum rocheux se situe à 10 m de profondeur et est considéré comme très fracturé. La surface de la nappe phréatique se situe au niveau du toit de l'argile, soit à 2 m de profondeur.

En prévision de l'aménagement, une campagne de sondages a été réalisée et des échantillons (1a, 1b, 2, 3a et 3b) ont été prélevés à différentes profondeurs : 4 m pour les échantillons 1a et 1b, 6 m pour l'échantillon 2 et 8 m pour les échantillons 3a et 3b (cf. Figure 1).

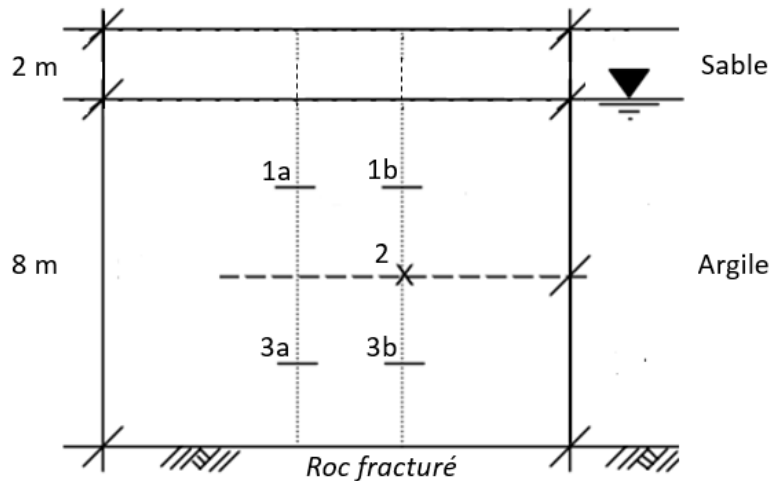


Figure 1 : Coupe de sol au droit du site et localisation des échantillons

### Partie I : Propriétés des sols (TOTAL : 5 points)

Les échantillons 1a et 3a ont été conservés dans de la paraffine pour éviter toute variation de teneur en eau, puis emmenés au laboratoire et testés. Les dimensions des échantillons de forme cylindrique sont les suivantes : diamètre = 75 mm et hauteur = 150 mm. On admettra que la densité des grains solides ( $\rho_s$ ) est égale à 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

L'échantillon 1a a été pesé avant et après séchage à l'étuve durant 24h et les masses mesurées sont respectivement  $M_{\text{avant}} = 1\,220$  g et  $M_{\text{après}} = 895$  g.

L'échantillon 3a, quant à lui, servi à déterminer les limites d'Atterberg de l'argile. Les résultats d'un essai à la coupelle de Casagrande et de la teneur en eau à la limite de plasticité sont fournis dans les Tableau 1 et 2.

Tableau 1 : Résultats d'un essai à la coupelle de Casagrande

N° essai	1	2	3	4	5
<b>Nbr de coups</b>	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>34</b>
Masse totale humide (g)	9,70	14,60	10,40	10,20	11,10
Masse totale sèche (g)	8,79	11,35	8,67	8,84	9,78
Masse Tare (g)	7,11	4,05	4,10	4,10	4,07

Tableau 2 : Mesures de la teneur en eau à la limite de plasticité (en duplicata)

Mesure	1	2
Masse totale humide (Sol + Tare) (g)	6,32	6,56
Masse totale sèche (Sol + Tare) (g)	5,94	6,15
Masse Tare (g)	2,8	2,7

1.1 Déterminez, pour l'échantillon 1a :

- la teneur en eau ( $w$ ), **(0,5 pt)**
- l'indice des vides ( $e$ ) et la porosité ( $n$ ), **(0,5 pt)**
- le degré de saturation ( $S_r$ ), **(0,5 pt)**
- la masse volumique saturée ( $\rho_{sat}$ ). **(0,5 pt)**

1.2 Déterminez, pour l'échantillon 3a :

- les limites de consistance  $w_p$ ,  $w_L$ , ainsi que l'indice de plasticité ( $I_p$ ). **(0,5 pt)**
- l'état de consistance de l'échantillon prélevé, sachant que sa teneur en eau naturelle est de 36%. **(0,5 pt)**
- Le type d'argile dont il pourrait s'agir. **Justifiez votre réponse. (0,5 pt)**

1.3 En supposant que l'argile au droit du site est une Montmorillonite (indépendamment de la réponse proposée en 1.2.c):

- donnez sa structure minéralogique, **(0,5 pt)**
- expliquez l'influence probable des aléas climatiques (Sécheresse, variation du niveau de la nappe phréatique, gel-dégel, etc...) sur cette argile et la manière dont cela pourrait affecter la fondation du silo envisagé. **(1 pt)**

## Partie II : Tassements de la couche d'argile (TOTAL : 5 points)

Le silo sera considéré comme un cylindre de hauteur utile de 3 m (Hauteur du matériau stocké), reposant directement sur une semelle superficielle à la surface du sol et représentant, à vide, une charge de 60 kPa. La masse volumique du blé stocké sera considérée égale à  $850 \text{ kg/m}^3$ .

Des essais œdométriques ont été réalisés sur les échantillons 1b et 3b, tel que présentés sur la Figure 2.

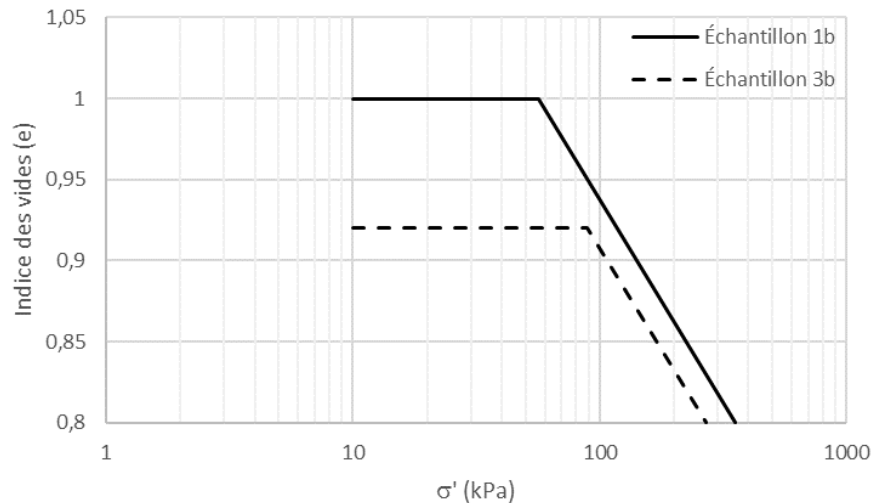


Figure 2 : Résultats d'essais œdométriques

La surface du silo sera considérée de très grande étendue par rapport à la profondeur d'argile et on supposera dans cette section que  $\gamma_{\text{sable}} = 20 \text{ kN/m}^3$  et  $\gamma_{\text{argile}} = 18 \text{ kN/m}^3$ .

2.1 Déterminez les coefficients de compression vierge ( $C_c$ ) des échantillons 1b et 3b. **(1 pt)**

**Pour la suite, on considérera que  $C_c = 0,25$ , indépendamment de la réponse obtenue en 2.1**

2.2 En considérant deux couches de même épaisseur dans l'argile, calculez le tassement lié à la consolidation primaire au centre du silo rempli de blé. **(2 pts)**

2.3 Déterminez le temps nécessaire pour atteindre 95% de la consolidation primaire. Vous supposez un coefficient de consolidation  $c_v = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . **(1 pt)**

2.4 Calculez la compression secondaire 5 ans après la fin de la consolidation primaire. Vous considérerez un coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha} = 0,012$ . **(1 pts)**

### Partie III : Résistance de la couche d'argile (TOTAL : 5 points)

Comme dans la partie II, on considèrera dans cette section que le silo est un cylindre de hauteur utile de 3 m (Hauteur du matériau stocké), reposant directement sur une semelle superficielle à la surface du sol et représentant, à vide, une charge de 60 kPa. La masse volumique du blé stocké sera considérée égale à  $850 \text{ kg/m}^3$ .

La surface du silo sera considérée de très grande étendue par rapport à la profondeur d'argile et on supposera  $\gamma_{\text{sable}} = 20 \text{ kN/m}^3$  et  $\gamma_{\text{argile}} = 18 \text{ kN/m}^3$ .

Des essais triaxiaux non drainés et drainés sont réalisés sur l'échantillon 2 prélevé à 6 m de profondeur :

- (a) CU : pression cellulaire  $\sigma_c = 90 \text{ kPa}$  et déviateur à la rupture = 60 kPa
- (b) CD : pression cellulaire  $\sigma_c = 90 \text{ kPa}$  et déviateur à la rupture = 108 kPa

3.1 Déterminez les paramètres de Mohr-Coulomb de l'argile. **(1 pt)**

3.2 Si elle avait été mesurée durant l'essai CU, quelle aurait été la pression interstitielle à la rupture dans l'échantillon? **(2 pts)**

3.3 Existe-t-il un risque de rupture à 6 m de profondeur à long terme, c'est-à-dire après dissipation des surpressions interstitielles liées à la construction et au remplissage du silo? **(2 pts)**

### Partie IV : Compactage

Afin de permettre l'accès au silo par les engins agricoles, il est prévu de réaliser un chemin en remblai compacté de 100 m de long et de 50 cm d'épaisseur, selon la géométrie fournie en Figure 3.

La courbe Proctor normal du remblai qui sera utilisé est fournie en Figure 4. Celui-ci sera prélevé sur un banc d'emprunt situé à 5 km du site et sera transporté vers l'exploitation par des camions d'une capacité de 18 Tonnes. À l'état naturel, le remblai possède un indice des vides de 0,8; une teneur en eau de 8 % et la densité relative des grains est de 2,70.

On considèrera que le remblai sera compacté à 95% de l'optimum Proctor normal et que sa teneur en eau sera égale à celle de l'optimum.

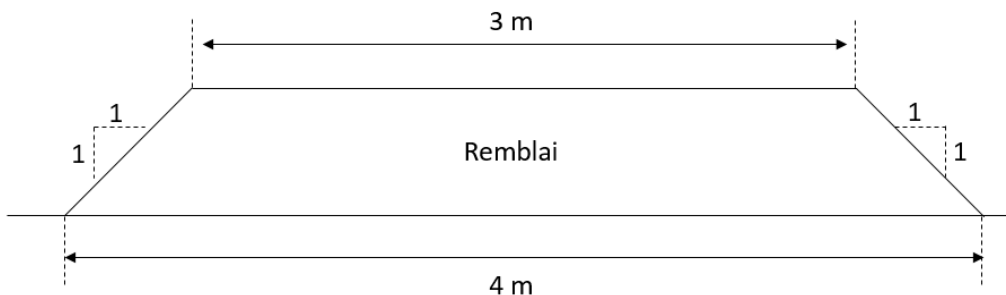


Figure 3 : Section verticale du chemin en remblai

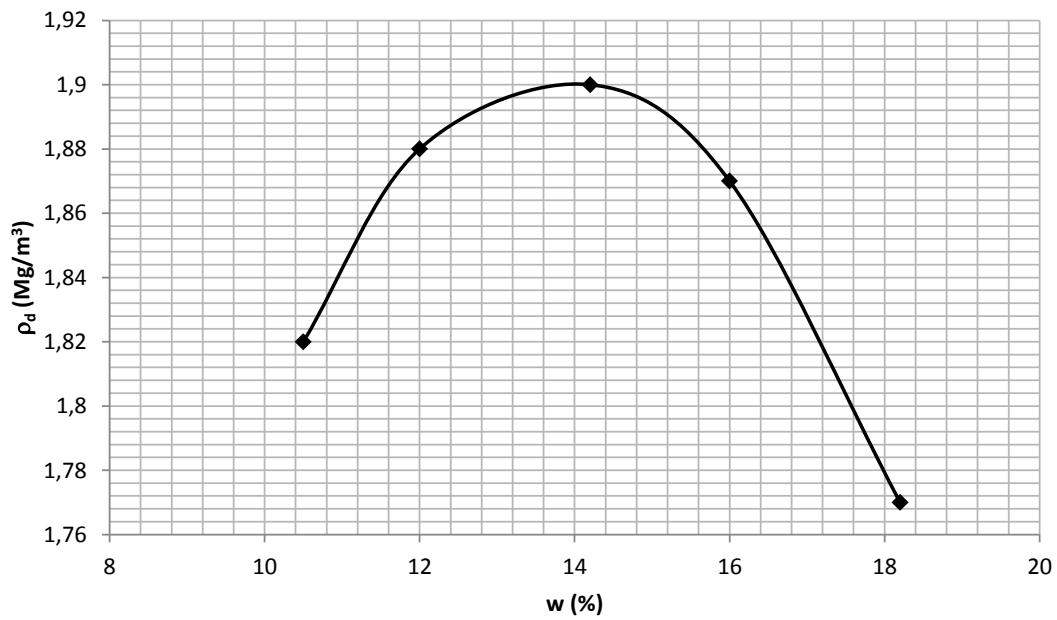


Figure 4 : Courbe Proctor Normal du remblai

- 4.1 Calculer le volume de matériau de remblai à excaver sur le banc d'emprunt. **(2 pts)**
- 4.2 Combien de voyages de camions seront nécessaires pour amener le matériau sur le site? On considèrera que la mise en camion ne modifie pas la teneur en eau du remblai et on négligera les pertes liées à la manipulation du matériau lors du chargement. **(1 pt)**
- 4.3 Quel type de matériel choisiriez-vous pour le compactage de ce remblai? Justifiez. **(2 pts)**