

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE MAI 2016

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 : Compactage  
Partie III : Tassements  
Partie IV : Résistance

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 7 pages incluant celle-ci.

## AMÉNAGEMENT D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE

Dans le cadre de l'aménagement d'une exploitation agricole, il est prévu de construire une voie d'accès pour des engins agricoles lourds.

Au droit du site, le sol est composé d'une couche de sable de 1 m d'épaisseur reposant sur une couche d'argile de 6 m d'épaisseur. Le substratum rocheux se situe à 7 m de profondeur et est considéré comme non fracturé. La surface de la nappe phréatique se situe au niveau du toit de l'argile, soit à 1 m de profondeur.

En prévision de l'aménagement, une campagne de sondages a été réalisée et des échantillons de sable et d'argile ont été prélevés à des profondeurs respectives de 0,5 et 4 m.

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

- 1.1 Un échantillon de sable possède un volume de  $1\,000\text{ cm}^3$ , une masse totale de  $2\,250\text{ g}$  et une teneur en eau de 5%. Sachant que la densité relative des grains solides est de 2,70, complétez le diagramme des phases fourni en Annexe 1 (cf. Figure 1.1). **(1 pt)**
- 1.2 À l'aide du diagramme des phases, calculez la masse volumique du sol sec ( $\rho_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le degré de saturation ( $S_r$ ). **(1 pt)**
- 1.3 Quelle serait la teneur en eau au point de saturation si le sol était saturé à volume constant ? **(1 pt)**
- 1.4 Donnez la (les) classification(s) du sable possible(s) dans le système USCS en considérant la courbe granulométrique fournie à la Figure 1.2 en Annexe 1. **(1 pt)**
- 1.5 Des essais de détermination des limites d'Atterberg ont été réalisés sur un échantillon d'argile (cf. résultats présentés dans les Tableaux 1.1 et 1.2 en Annexe 2). **(1 pt)**
  - a) Déterminez les limites de consistance  $w_p$ ,  $w_L$ , ainsi que l'indice de plasticité ( $I_p$ ),
  - b) Indiquez l'état de consistance de l'échantillon prélevé, sachant que sa teneur en eau naturelle est de 28%,
  - c) Donnez l'appellation du sol selon la classification USCS.

### Partie II : Compactage (TOTAL : 5 points)

Afin de permettre l'accès au silo par les engins agricoles, il est prévu de réaliser un chemin en remblai compacté, dont les résultats d'un essai Proctor Normal sont fournis dans le Tableau 2.1. La densité relative des grains solides du remblai est  $D_r = \rho_s/\rho_w = 2,70$ .

- 2.1 Tracez la courbe de compactage ( $\rho_d$  en fonction de  $w$ ) et déduisez-en la masse volumique maximale du sol sec, la teneur en eau et le degré de saturation à l'optimum. **(2 pts)**
- 2.2 Tracez la courbe de saturation 100% pour des teneurs en eau allant de 6% à 9%. **(1 pt)**

2.3 Quel type de matériel choisiriez-vous pour le compactage de ce remblai? Justifiez. **(1 pt)**

2.4 Le sable silteux est utilisé pour construire un remblai compacté au rouleau par couches successives. Selon les exigences, une couche compactée est acceptée si sa compacité relative est 95% (minimum), et, si sa teneur en eau est comprise entre l'optimum – 1,5% et l'optimum + 1%. En un point choisi au hasard dans une couche compactée, on a obtenu une teneur en eau 4,5% et une masse volumique du sol humide  $2,05 \text{ Mg/m}^3$ . La couche est-elle conforme aux exigences ? Justifiez la réponse. **(1 pt)**

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

La voie d'accès à construire consiste essentiellement en un remblai de 75 cm d'épaisseur, dont la masse volumique sèche  $\rho_d$  est de  $1,9 \text{ g/cm}^3$ . On considèrera que celui-ci reste sec au fil du temps.

Pour mémoire, le sol au droit du site est composé d'une couche de sable de 1 m d'épaisseur reposant sur une couche d'argile de 6 m d'épaisseur. Pour cette partie, on fera l'hypothèse que le sable possède une masse volumique sèche de  $2,14 \text{ g/cm}^3$ , un indice des vides de 0,26 et que la masse volumique de l'argile saturée est de  $1,72 \text{ g/cm}^3$ .

Le substratum rocheux se situe à 7 m de profondeur et est considéré comme non fracturé. La surface de la nappe phréatique se situe au niveau du toit de l'argile, soit à 1 m de profondeur.

Un essai de consolidation, dont les résultats sont fournis dans le Tableau 3.1, a été réalisé sur un échantillon d'argile prélevé à 4 m de profondeur.

3.1 Déterminez les coefficients  $C_r$  et  $C_c$  pour l'argile, **(1 pts)**

3.2 Déterminez la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  par la méthode de Casagrande. S'agit-il d'une argile normalement consolidée ou surconsolidée? Justifiez votre réponse. **(1 pt)**

Pour la question suivante, vous assumerez que  $C_r = 0,1$  ;  $C_c = 1$  et que l'argile est normalement consolidée.

3.3 Calculez le tassement de consolidation primaire de la couche d'argile suite à l'ajout du remblai. **(1pt)**

3.4 En considérant un coefficient de consolidation  $C_v$  de  $0,2 \text{ cm}^2/\text{min}$ , déterminez le temps nécessaire pour obtenir 95 % de la consolidation primaire sur le site. **(1 pt)**

3.5 En considérant un indice de compression secondaire égal à 5% de l'indice de compression vierge, calculez le tassement total 5 ans après la fin de la consolidation primaire **(1 pt)**.

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

Dans l'optique de réaliser un hangar pour les engins agricoles sur le site, des essais triaxiaux consolidés non-drainés ont été réalisés sur trois échantillons d'argile prélevés à 4 m de profondeur. Les résultats sont fournis dans le Tableau 4.1 en Annexe 2.

- 4.1 Tracez l'enveloppe de Mohr-Coulomb en contraintes effectives. **(1 pt)**
- 4.2 Déterminer les paramètres  $a'$  et  $\psi'$  de la droite  $K_f$  et les paramètres  $c'$  et  $\phi'$  de l'enveloppe de Mohr-Coulomb. **(1 pt)**
- 4.3 Déterminez l'orientation du plan de rupture. **(1 pt)**
- 4.4 Un quatrième échantillon d'argile taillé dans le même bloc est consolidé dans la cellule triaxiale sous la pression cellulaire de 200 kPa, puis il est cisailé en maintenant fermé le circuit de drainage. Quels sont alors le déviateur à la rupture  $\Delta\sigma_f$  et la pression interstitielle à la rupture  $u_f$  obtenus dans cet essai ? **(2 pts)**

## ANNEXE 1 : Figures

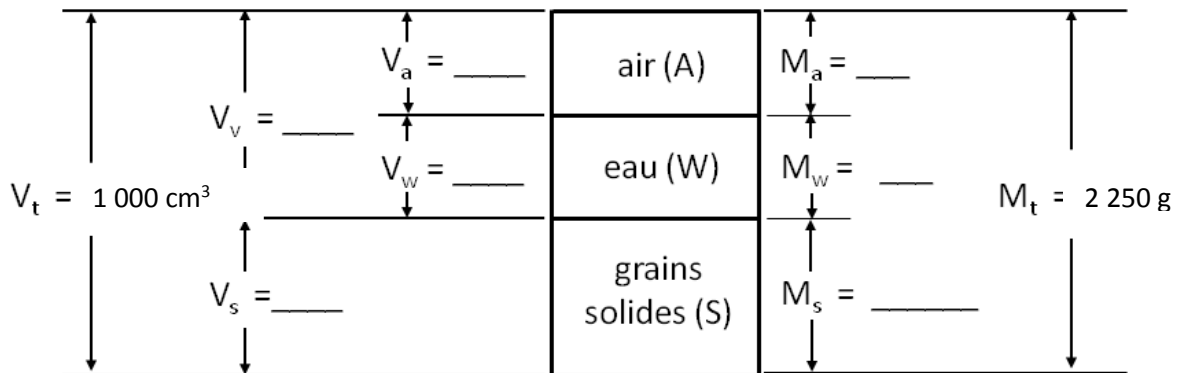


Figure 1.1 : Diagramme des phases d'un échantillon de sable

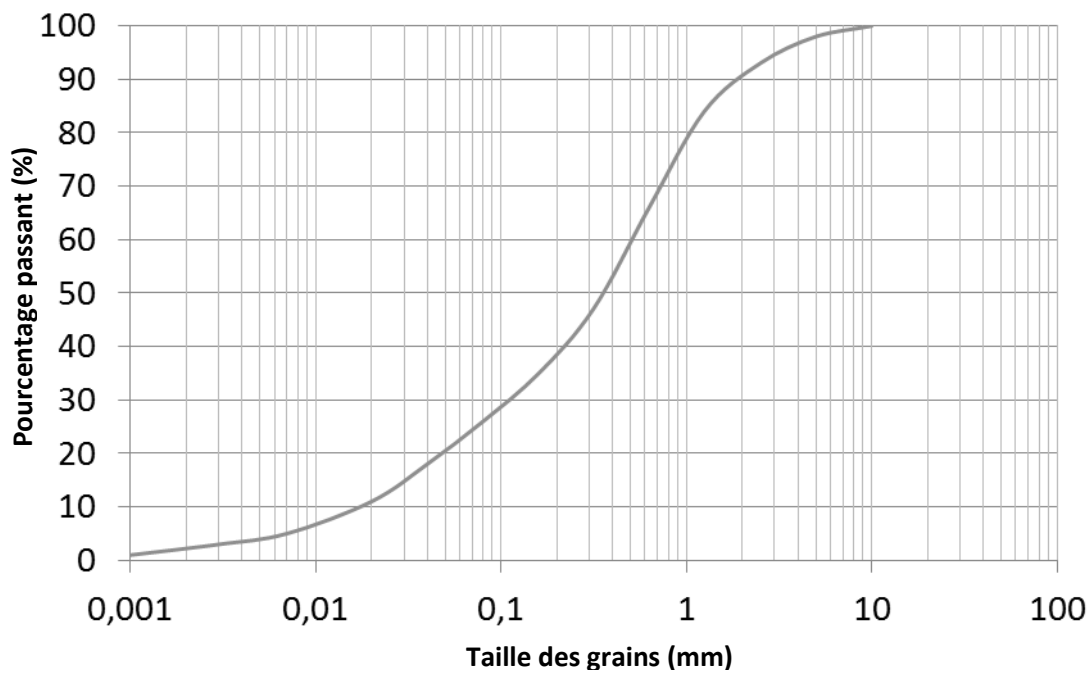


Figure 1.2 : Courbe granulométrique d'un échantillon de sable

## ANNEXE 2 : Tableaux

Tableau 1.1 : Résultats d'essais à la coupelle de Casagrande

Essai	1	2	3	4	5
Nombre de coups	17	21	26	30	34
Masse totale humide (Sol + Tare) (g)	9,35	13,69	10,11	10,31	11,5
Masse totale sèche (Sol + Tare) (g)	8,79	11,35	8,67	8,84	9,78
Masse Tare (g)	7,11	4,05	4,1	4,1	4,07

Tableau 1.2 : Mesures de teneurs en eau à la limite de plasticité

Essai	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

Tableau 2.1 : Résultats d'un essai Proctor Normal

Essai	1	2	3	4	5	6
Teneur en eau - w (%)	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
Masse volumique humide - $\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1,957	2,101	2,205	2,247	2,236	2,203

Tableau 3.1 : Résultat d'un essai œdométrique

$\sigma'$ (kPa)	e
10	1,16
20	1,12
30	1,10
40	1,05
50	0,97
60	0,90
70	0,84
80	0,78
90	0,73
100	0,69

Tableau 4.1 : Résultats d'essais triaxiaux consolidés non drainés

Essais	Pressions cellulaires de consolidation $\sigma_c$ (kPa)	Déviateurs à la rupture $\Delta\sigma_f$ (kPa)	Pressions interstitielles à la rupture $u_f$ (kPa)
(1)	100	75	70
(2)	350	262,5	245
(3)	500	375	350