

SESSION 2009

**CONCOURS EXTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

Section : GÉNIE CIVIL

**ÉPREUVE DE GÉOTECHNIQUE
ET DE QUALITÉ DES AMBIANCES**

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Cette épreuve est constituée de deux sujets indépendants :

- géotechnique et environnement
- qualité des ambiances (partie thermique et partie acoustique)

Il est demandé aux candidats de traiter les deux sujets sur des copies séparées.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

Géotechnique et environnement

(10 points)

Avertissement

Pour la rédaction de ce sujet, les membres du jury ont souhaité proposer aux candidats un problème qui permette des développements des fondamentaux de la géotechnique en direction de l'identification et la caractérisation des matériaux géotechniques et en direction de l'interaction sols-structures.

La présente composition traite, sur un projet donné, des aspects relatifs :

- *à la géologie générale,*
- *aux moyens de reconnaissance géotechnique et à l'interprétation des données qui résultent de la reconnaissance,*
- *à la compréhension des grands mécanismes régissant les massifs de sol dans leur état naturel,*
- *à l'interaction sol-structure, au dimensionnement des ouvrages et à leurs suivis.*

Le sujet est rédigé de façon à ce que les différentes parties puissent être traitées de manière relativement indépendante. Toute donnée numérique non fournie est laissée à l'appréciation des candidats.

GENERALITES

Le problème traite du dimensionnement d'un quai maritime construit en bordure de l'estuaire du fleuve S.

Les niveaux altimétriques sont exprimés en « Cotes Marines » (CM). Localement, le zéro « Cote Marine » est situé 4,38 m au-dessous du zéro du nivellement général de la France NGF.

Le sujet est constitué :

- du présent texte décrivant le problème et formulant 31 questions,
- de 3 annexes précisant les données (tableaux, figures) et indiquant des formules utiles.

LE SITE : GEOLOGIE ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES

Géologie générale du site

La lecture de la carte géologique de la région fournit des premiers éléments d'appréciation des conditions géotechniques du site de construction de l'ouvrage :

- le substratum est constitué par des terrains d'âge Jurassique ; au droit de l'ouvrage, ce substratum a été érodé jusqu'à la cote - 27,00 NGF, c'est à dire jusqu'aux argiles de Villerville constituant le niveau supérieur de l'Oxfordien supérieur (Séquanien) ; ces argiles, d'épaisseur pouvant atteindre 45 m au droit du port, se décomposent, en partie supérieure, en argiles brunes comportant notamment des marnes brunes et, en partie inférieure, en argiles noires ;
 - les alluvions déposées sur ce substratum sont constituées de graviers de fond (galets de silex de 30 à 100 mm mélangés à des sables grossiers), d'épaisseur 3 à 12 m, d'argiles blanchâtres, silteuses et collantes, dont l'épaisseur peut atteindre 7 à 9 m, d'argile tourbeuse compacte (1,50 à 3 m d'épaisseur), de silts gris organiques (5 à 7 m d'épaisseur) et enfin de sables, d'abord grossiers puis plus fins (10 à 20 m d'épaisseur) ;
 - des sables ont été mis en remblai, par voie hydraulique, en couverture de ces alluvions.
- 1) Rappelez quelles sont les grandes ères géologiques ; à quelle ère appartient la période Jurassique ; datez approximativement la période.
 - 2) Indiquez quels phénomènes climatiques ont marqué l'ère quaternaire. Précisez quelles ont été les conséquences de ces changements climatiques sur les niveaux de la mer. Quand a eu lieu le dernier « grand » changement climatique ?
 - 3) Quelles conséquences ont eu les mouvements du niveau de la mer sur le niveau de base du lit de la rivière S. ?
 - 4) Donnez une interprétation de la lithologie donnée par la carte géologique, mentionnée dans le texte ci-dessus.

Nature et état des matériaux du site

- 5) Quelles coupures granulométriques séparent les sables grossiers des sables fins, les sables fins des limons, et les limons des argiles ?

- 6) Le Tableau 1 en annexe indique les pourcentages de matériaux passant différentes mailles de tamis, pour un ensemble d'échantillons prélevés sur toute la hauteur des alluvions récentes. Il précise les niveaux auxquels ont été rencontrés les niveaux de base, alluvions anciennes et substratum. Compte tenu des paramètres d'identification fournis, précisez dans ce tableau (à rendre avec la copie) la nature de chaque matériau (sable fin ou grossier, sable limoneux, sable argileux, limon, limon sableux, limon argileux, argile, etc.) ; distinguez les horizons sableux et les horizons plus fins. Sur la base de ces résultats et des éléments de géologie générale donnés ci-dessus, dressez la coupe lithologique du site.
- 7) Rappelez la définition du coefficient d'uniformité de Hazen d'une courbe granulométrique. Les sables rencontrés sont-ils bien gradués ou mal gradués ? Justifiez votre réponse.
- 8) On considère l'échantillon de sable prélevé à la cote $-3,53$ CM (Tableau 1) ; le poids spécifique des grains est égal à 27 kN/m^3 ; déterminez l'indice des vides, la porosité, ainsi que le degré de saturation du sol.
- 9) En vous appuyant sur le diagramme de Casagrande, donnez la classe de plasticité des limons constituant le niveau de base des alluvions récentes. On considère l'échantillon de sol prélevé à la cote $-25,08$ CM (Tableau 1) ; le poids spécifique des grains est égal à $26,5 \text{ kN/m}^3$; déterminez l'indice des vides, la porosité, ainsi que le degré de saturation du sol.

Hydrologie du site

- 10) En quoi la porosité intervient-elle sur le comportement hydraulique des matériaux ? En quoi la taille des grains intervient-elle sur le comportement hydraulique des matériaux ? Définissez la perméabilité d'un sol. Indiquez les modalités d'un essai permettant de déterminer la perméabilité des matériaux. Donnez un ordre de grandeur de la perméabilité des matériaux rencontrés.
- 11) Le niveau de la rivière S. varie avec la marée. Les conditions extrêmes de marée, fonction des conditions astronomiques et atmosphériques, sont définies par les niveaux suivants :
 - Haute mer de vives eaux d'équinoxe : $+9,10$ CM,
 - Plus basse Haute mer de mortes eaux : $+ 5,85$ CM,
 - Plus haute Basse mer de mortes eaux : $+ 3,20$ CM,
 - Marée basse de vives eaux d'équinoxe : $+0,10$ CM.

Décrivez le système hydrologique des alluvions : identifiez les différentes nappes ; identifiez les conditions aux limites de chacune de ces nappes ; donnez une estimation qualitative du fonctionnement de chacune de ces nappes.

Propriétés mécaniques des matériaux

- 12) Le critère de Coulomb s'écrit $\tau = \sigma_n' \tan\phi' + c'$ dans le diagramme de Mohr, σ_n' et τ représentant respectivement les composantes normales et tangentielles des contraintes effectives s'appliquant aux facettes sur lesquelles la rupture est atteinte. Ecrivez ce critère dans le diagramme (s' , t), où s' et t désignent respectivement la

moyenne des contraintes principales $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ et le demi-déviateur $t = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$.

- 13) Afin de déterminer la résistance au cisaillement, on a réalisé des essais à l'appareil triaxial en condition drainée (Tableau 2). Décrivez le principe de l'essai. Reportez sur un diagramme (s' , t) les valeurs de s' et t atteintes à la rupture pour l'ensemble des essais de cisaillement et déterminez les paramètres de résistance au cisaillement des matériaux. Si cela se justifie, vous distinguerez les couches de sol, dans votre analyse.
- 14) Quelles modalités d'essai appliqueriez vous pour déterminer les paramètres de résistance au cisaillement non drainé des limons ? Les essais réalisés conduisent à une valeur de λ_{cu} égale à 0,4. Déduisez-en une valeur représentative de la cohésion non drainée des limons situés à la base des alluvions récentes.
- 15) Le résultat d'un essai pressiométrique est donné Figure 1. Décrivez brièvement le principe de réalisation et l'appareillage utilisé. Illustrez par un schéma. A quelles caractéristiques géotechniques cet essai permet-il d'accéder ?
- 16) Procédez au dépouillement de l'essai pressiométrique donné en Figure 1 :
 - Pourquoi a-t-on établi une « courbe corrigée » ? quelles sont les « corrections » apportées à la mesure ?
 - Identifiez de façon sommaire le « palier pseudo-élastique » ; précisez comment est choisi le centre de ce palier pseudo-élastique ;
 - Calculez le module pressiométrique du sol (expression donnée en annexe, Equation 1) ;
 - La pression limite est définie par convention comme « la pression qui entraîne le doublement du volume de la cellule centrale de mesure » ($V = V_s + 2V_l$, compte tenu des conventions de notation adoptées en annexe, Equation 1) ; donnez une estimation de la pression limite du sol.
- 17) Donnez une estimation la valeur du module d'Young de la couche considérée par cet essai. Quelle est l'utilité de ce paramètre ?

LE QUAI – ANALYSE DU COMPORTEMENT OBSERVE

Principe de l'ouvrage et techniques de réalisation

Le quai est constitué d'une paroi en béton armé ancrée à un rideau de palplanches (Figure 2) :

- La paroi en béton armé est constituée d'une paroi moulée de 1,20 m d'épaisseur et de 40 m de profondeur ancrée dans les argiles de Villerville, surmontée par une poutre de couronnement en béton armé de 3,43 m de largeur et de 1,50 m de hauteur. L'ensemble est muni d'un masque d'accostage de 9,10 m de hauteur et 1,60 m de largeur.
- La paroi est retenue par deux nappes de tirants passifs faiblement inclinés, mis en place dans les terrains remblayés après terrassement sur 17 m de hauteur environ derrière la paroi. Ces tirants sont fixés à un rideau de palplanches situé à une distance de 45,40 m derrière la paroi moulée.

Le couronnement du quai ainsi que la surface des terre-pleins sont établis à la côte +10,20 CM.

- 18) Décrire le principe de réalisation de la paroi moulée. On précisera notamment :
- les différentes phases de réalisation d'un panneau de paroi-moulée ;
 - le rôle de la boue de bentonite en phase de réalisation. Quel niveau doit atteindre la boue par rapport au niveau des nappes ?
 - les limites d'emploi de la technique ;
 - les alternatives possibles à cette technique, dans le cas présent.
- 19) Comment justifiez-vous le fait de mettre en place des ancrages en position relativement basse ? Indiquez le phasage de travaux à suivre pour installer ces tirants et donnez les avantages et les inconvénients de cette disposition.

Principes d'instrumentation

- 20) Lors de sa réalisation, le quai a été équipé de tubes inclinométriques et d'extensomètres à cordes vibrantes :
- Qu'est-ce qu'un tube inclinométrique ? Comment est-il mis en place ? Que mesure-t-on et suivant quelles modalités ? Que peut-on déduire de la mesure ?
 - Qu'est-ce qu'un extensomètre à corde vibrante ? Quel est le principe de mesure ? Que mesure-t-on et suivant quelles modalités ? Que peut-on déduire de la mesure ?

Etat des contraintes dans le sol avant travaux

Le modèle géotechnique du site retenu pour le calcul de l'ouvrage est donné dans le Tableau 3.

Pour les nappes qui sont en relation avec la marée (terrain situé devant l'ouvrage), la charge hydraulique est modélisée comme suit (Tableau 4) :

- elle est supposée constante en tout point de la nappe,
- elle varie dans le temps avec la marée :

- avec une amplitude atténuée,
- avec un déphasage dans le temps,
- en restant néanmoins centrée autour du niveau de mi-marée.

Pour les nappes qui sont protégées par la paroi (terrain situé derrière l'ouvrage), la charge hydraulique est modélisée comme suit, en situation de service (Tableau 5) :

- la nappe des sables est statique (elle n'est plus influencée par la marée),
 - la nappe des graves reste fortement corrélée avec la marée.
- 21) On se place en configuration initiale, avant tous travaux. Pour des situations de marée haute et de marée basse respectivement à +7,90 et +1,30 CM, déterminez les profils :
- des pressions d'eau régnant dans les alluvions,
 - des contraintes totales et effectives s'exerçant sur des facettes horizontales du terrain,
 - des contraintes effectives et totales s'exerçant sur les facettes verticales du terrain.

Nota : on justifiera les approximations faites, le cas échéant ; pour les couches de sols fins, on indiquera les hypothèses faites, tant pour le calcul des pressions d'eau que des pressions de sol.

Comportement de l'ouvrage

On cherche à apprécier le comportement observé de l'ouvrage. Dans cet objectif, on considère dans les questions qui suivent différents états de référence du sol, les états d'équilibre limites de poussée et de butée.

On se place en configuration finale de l'ouvrage (Figure 2).

- 22) Déterminez le profil des pressions d'eau qui s'appliquent sur chacune des faces de la paroi, à marée basse ainsi qu'à marée haute. On utilisera les modèles hydrologiques donnés dans les Tableau 4 et Tableau 5.

On considère dans un premier temps la situation de marée basse, défavorable du point de vue de l'équilibre de l'ouvrage. La situation considérée est caractérisée par un niveau de basse mer à +1,30 CM.

- 23) On s'intéresse aux efforts appliqués sur la face arrière de la paroi (côté sol soutenu). A quelles conditions le terrain soutenu peut-il être amené à l'état d'équilibre de poussée, sur toute la hauteur du soutènement ? Cette condition est-elle remplie ? Etablissez dans ces conditions le diagramme des contraintes effectives appliquées par le terrain soutenu à l'ouvrage. On fera appel à la théorie de Rankine et on indiquera les limites de cette théorie. Le calcul sera mené pour la situation de marée basse.
- 24) A quelles conditions le terrain situé devant la paroi peut-il être amené à l'état d'équilibre limite de butée, sur toute la hauteur de la fiche ? Etablissez le diagramme de butée effective du terrain sur l'ouvrage. On fera encore appel à la

théorie de Rankine et on indiquera les limites de cette théorie. Le calcul sera mené pour la situation de marée basse.

Les efforts d'ancrage mesurés dans les tirants sont donnés Tableau 6 (intensité des efforts d'ancrage de la paroi) et Figure 3 (distribution des efforts dans les tirants).

- 25) Expliquez la forme prise par la distribution de la tension d'ancrage le long des tirants. On expliquera notamment pourquoi la tension est relativement constante sur une partie de la longueur des tirants, puis décroît sur la longueur restante.
- 26) Expliquez la forme prise par la distribution des efforts de flexion le long des tirants. On expliquera notamment pourquoi la flexion apparaît en extrémité des ancrages. Que préconisez vous pour limiter ces efforts parasites ?
- 27) En considérant les efforts d'ancrage donnés sur le Tableau 6 et le calcul de butée établi à la question 24), justifiez de l'équilibre de l'ouvrage dans la situation de marée basse.

La courbe des déplacements mesurés de l'ouvrage est donnée sur la Figure 4.

- 28) Quel type d'appui la paroi mobilise t-elle en fiche. On commentera les hypothèses respectives d'un appui simple et d'un encastrement.
- 29) En faisant des hypothèses simples, calculez un ordre de grandeur du moment fléchissant maximal mobilisé dans la paroi.

On s'intéresse dans un second temps au comportement de la paroi à marée haute (+7,90 CM). Le profil des pressions d'eau qui s'applique sur chacune des faces de la paroi, à marée haute, a été calculé à la question 22).

- 30) Quel est l'état d'équilibre du terrain derrière la paroi ? Discutez de l'emploi de la méthode du coefficient de réaction pour évaluer la poussée appliquée par le sol à la paroi. En vous appuyant sur la formule de Ménard (Equation 2 en annexe), évaluez le coefficient de réaction du sol soutenu et déduisez en le diagramme des poussées appliquées par le terrain au sol.
- 31) En considérant les efforts d'ancrage donnés sur le Tableau 6 et le calcul de butée établi à la question 24), justifiez de l'équilibre de l'ouvrage dans la situation de marée haute.

ANNEXE 1 – FORMULAIRE

$$E_M = 2(1+\nu)[V_s + (V_1 + V_2)/2](p_2 - p_1)/(V_2 - V_1) \quad \text{Équation 1}$$

- ν : coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33
- V_s : volume de la cellule centrale de mesure de la sonde ; $V_s = 540 \text{ cm}^3$
- p_2, V_2 , pression et volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudoélastique
- p_1, V_1 , pression et volume correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique

$$k_h = \frac{E_M}{\frac{\alpha a}{2} + 0,133(9a)^\alpha} \quad \text{Équation 2}$$

- α : coefficient rhéologique, pris égal à 0,33 dans les sables
- E_M : module pressiométrique de Ménard
- a : dimension caractéristique de la structure en interaction avec le sol (dimension de la zone de contact de la structure avec le sol).

Tableau 2 – Résistance au cisaillement des alluvions récentes : résultat des essais triaxiaux (consolidés drainés).

Cote CM (m)	Nature géologique	s' (kPa)	t (kPa)
0,5	Sable fin	78,5	48,5
0,5	Sable fin	155,5	103,5
0,5	Sable fin	252	151
-0,225	Silt vaseux	227,5	127,5
-0,225	Silt vaseux	470	270
-0,225	Silt vaseux	890	490
-1,1	Silt vaseux	217,5	117,5
-1,1	Silt vaseux	485	285
-1,1	Silt vaseux	920	520
-1,4	Silt vaseux	260	160
-1,4	Silt vaseux	487,5	287,5
-1,8	Silt vaseux	852,5	452,5
-1,8	Silt vaseux	250	150
-1,8	Silt vaseux	452,5	252,5
-1,8	Silt vaseux	827,5	427,5
-7,005	Sable mal gradué	220	120
-7,005	Sable mal gradué	555	355
-7,005	Sable mal gradué	855	555
-13,98	Sable limoneux	485	335
-13,98	Sable limoneux	1110	760
-13,98	Sable limoneux	1780	1230
-17,13	Sable mal gradué	1925	1425
-17,13	Sable mal gradué	1150	800
-17,13	Sable mal gradué	675	475
-21,24	Limon tourbeux	246	127
-21,24	Limon tourbeux	343	142
-21,24	Limon tourbeux	338	172
-22	Limon sableux	357	127
-22	Limon sableux	410	131
-22	Limon sableux	305	185
-22	Limon sableux	324	198
-22	Limon sableux	324	200
-22	Limon sableux	403	214
-22,28	Limon sableux organique	700	400
-22,28	Limon sableux organique	790	440
-22,28	Limon sableux organique	874	474
-23,18	Sable limoneux	765	465
-23,18	Sable limoneux	966	616
-23,18	Sable limoneux	993	593

Tableau 3 – Modèle géotechnique du site.

Nature des terrains	Cotes CM	γ	φ' (φ_u)	c' (c_u)	q_c	p_L-p_0	E_M
	m	kN/m ³	degré	kPa	MPa	MPa	MPa
remblais nouveaux	+10,2 à -7,5	19,5	40	0	8	-	(15)
remblais hydrauliques	TN (+9,5) à +0,0	18,0		0	10	0,7	7
dépôts organiques récents	+0,0 à -2,0	16,0		0 (2 à 15)	1	-	(10)
sables	-2,0 à -21	19,5		0	15	2	20
limons inférieurs	-21 à -26	18,0		0 (100)	-	1,5	22
graves de fond	-26 à -31,5	22,0		0	-	4,6	36
argiles de Villerville	substratum	20,0	20 (0)	20 (200)	-	1,9	22

Tableau 4 – Modèle hydrologique du site, avant construction de la paroi.

Nature des terrains	Cotes CM	Surélévation moyenne	Coefficient d'atténuation	Déphasage
	m	m	(rapport de l'amplitude de variation de la nappe à l'amplitude de la marée)	(temps)
remblais hydrauliques	TN (+9,5) à +0,0	Nappe statique à 6,50 CM		
dépôts organiques récents	+0,0 à -2,0			
sables	-2,0 à -21	0	0,3	1 h
Limons inférieurs	-21 à -26			
graves de fond	-26 à -31,5	0	0,60	30 mn
argiles de Villerville	substratum			

Tableau 5 – Modèle hydrologique des terrains abrités par la paroi, après construction de la paroi.

Nature des terrains	Cotes CM	Surélévation moyenne	Coefficient d'atténuation	Déphasage
	m	m	(rapport de l'amplitude de variation de la nappe à l'amplitude de la marée)	(temps)
remblais nouveaux	+10,2 à -7,5	Nappe statique à 5,60 CM		
sables	-7,50 à -21	Nappe statique à 5,60 CM		
Limons inférieurs	-21 à -26			
graves de fond	-26 à -31,5	0	0,60	30 mn
argiles de Villerville	substratum			

Tableau 6 – Efforts d'ancrage mesurés, donnés par mètre linéaire de paroi.

Situation	Tirants de la nappe supérieure (kN/m de paroi)	Tirants de la nappe inférieure (kN/m de paroi)
Marée haute (+7,90 CM)	520	800
Marée basse (+ 1,30 CM)	600	1250