

GÉOTECHNIQUE 2 : MINI - PROJET

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2006 - 2007

ÉTUDE D'UN REMBLAI SUR SOL COMPRESSIBLE

Le franchissement d'un chemin départemental nécessite la réalisation d'un remblai de X m de hauteur au-dessus du terrain naturel pour une largeur de plate-forme de Y m. Sauf pour la question 1 on adoptera, pour toutes les phases de l'édification de ce remblai, un coefficient de sécurité global au moins égal à 1,5. En cours de construction, on ne tiendra pas compte des variations de largeur de la plate-forme que l'on supposera constamment égale à Y m. Les valeurs de X et Y sont données en annexe 1.

Le corps du remblai sera constitué par un sable de rivière présentant un angle de frottement $\varphi' = 35^\circ$ et une cohésion $c' = 0$; le poids volumique de ce matériau mis en œuvre est $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

Un sondage avec prélèvement d'échantillons intacts et un forage scissométrique ont été réalisés dans l'axe du futur remblai. Le sol de fondation a été décomposé en trois couches : 0 - 4 m; 4 - 9 m et 9 - 14 m. Les caractéristiques mécaniques de ces couches sont données en annexe 2.

I - ÉTUDE DE LA STABILITÉ

1. Pente de talus

Entre les pentes de talus 1/2, 3/5, 2/3 et 3/4, quelle est celle qui assure la stabilité propre des talus et qui est la plus économique ?

Cette pente sera retenue pour la suite des calculs.

Expliquez que l'on peut, pour cette question, prendre un coefficient de sécurité proche de 1.

2. Épaisseur du remblai

2 - a Calculer, dans l'axe du remblai, le tassement de consolidation primaire dû au terrassement de remblais de 7, 8 et 9 m d'épaisseur. Pour simplifier le calcul, on prendra le même coefficient d'influence pour les 3 largeurs de la base du remblai (coefficients d'influence sont constants et égaux à ceux calculés sous 8 m de remblai). L'effet de c_s ne sera pas négligé.

2 - b A l'aide de la courbe contrainte - déformation d'un essai triaxial U.U., réalisé avec une valeur de la pression cellulaire σ_0 égale à la contrainte géostatique à 8 m de profondeur, on a déterminé le module sécant $E = 3000$ kPa pour un déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) au triaxial voisin du déviateur moyen ($\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_x$) correspondant à la charge du remblai. On admettra que le module E ainsi déterminé est représentatif des trois couches de sol et qu'il reste le même pour les trois hauteurs de remblai 7, 8 et 9 m.

Calculer le tassement immédiat dans l'axe du remblai pour les trois hauteurs de remblai (avec un coefficient de Poisson $\nu = 0,5$ - cf. annexe 3), en considérant le sous-sol homogène vis-à-vis de E .

2 - c Le tassement de consolidation secondaire est négligeable. A partir des résultats précédents, tracer la courbe donnant le tassement (tassement immédiat + tassement primaire) en fonction de la hauteur du remblai : $s = f(H)^1$.

En déduire

- la surépaisseur à donner au remblai pour compenser le tassement à long terme afin que la plate-forme se stabilise à la cote du projet (solution graphique),
- l'épaisseur du remblai.

3. Hauteur de remblai mis en place en première étape

Pour être du côté de la sécurité on retiendra une valeur de la cohésion initiale c_u de 30 kPa représentative de l'ensemble de la couche compressible. Pour la valeur de l'indice de plasticité moyen donnée en annexe 1, déterminer la cohésion à introduire dans les calculs de stabilité (coefficient de correction de Bjerrum - cf. annexe 4).

3 - a Stabilité vis-à-vis de la rupture par poinçonnement

A partir de la définition du coefficient de sécurité : $F_s = \frac{N_c \cdot c_u}{\gamma_r \cdot H_r}$ déterminer la hauteur admissible

de remblai en première étape, le sous-sol étant considéré comme un massif semi-infini homogène.

En prenant en compte la présence d'un sol résistant en profondeur, déterminer par itération, à l'aide de l'abaque de Mandel et Salençon, la hauteur admissible de remblai en première étape [commencer l'itération avec la valeur minimale de $N_c (= \pi + 2)$].

Expliquez pourquoi le choix initial de $N_c = \pi + 2$. Le remblai se comporte-t-il comme une semelle lisse ?

3 - b Stabilité vis-à-vis de la rupture circulaire

A partir des abaques de Pilot et Moreau (cf. annexe 5 – cas d'un cercle profond tangent à la couche résistante) calculer le coefficient de sécurité en rupture circulaire que l'on obtiendrait avec la hauteur admissible déterminée au poinçonnement en première étape.

3 - c En déduire la hauteur de remblai que l'on peut mettre en place en première étape.

4. Hauteur limite d'édification

Le coefficient d'accroissement de la cohésion non drainée, $\tan\lambda$, représentatif de la couche compressible est égal à 0,249. Montrer par un calcul au poinçonnement qu'il existe une hauteur limite H_1 d'édification du remblai, construit en plusieurs étapes. Avant chaque nouvelle phase de construction, le degré de consolidation global moyen U , pris égal à 0,8, sous les charges déjà en place sera supposé constant. Pour tenir compte de la présence du talus, l'amélioration moyenne de la cohésion sera prise égal à la moitié de l'amélioration maximale.

5. Suivant les données de la question précédente, à quelle valeur du coefficient de sécurité correspondrait un remblai édifié à l'épaisseur voulue en attendant pour chaque étape un degré global moyen de consolidation sous les charges précédentes $U = 80\%$ (critère de poinçonnement).

6. On se propose de construire ce remblai avec banquettes latérales stabilisatrices. Les emprises permettent de mettre en place des banquettes sans limitation de largeur.

¹ On pourra aussi tracer : $s = f(H - s)$ ou encore $H - s = f(H)$

Quelle est la hauteur de banquette la plus appropriée ?

6 - a En première étape, le corps de remblai et les banquettes sont réalisées jusqu'à cette hauteur. Quelle est la valeur de la résistance au cisaillement à prendre en compte pour la deuxième étape, après 80 % de consolidation ?

6 - b Pour $F_s = 1,5$, en prenant la valeur de c_u égale 42 kPa (cette valeur sera justifiée à la question suivante), déterminer par utilisation de l'abaque de Pilot et Moreau (annexe 6 - abaques de gauche donnant L/H pour N et F fixés) la largeur L de la banquette à mettre en place.

6 - c En prenant le c_u calculé en 6-a et la largeur de banquette obtenue en 6-b, déterminer par utilisation de l'abaque de Pilot et Moreau (annexe 6 - abaques de droite donnant F pour N, D/H et F/H fixés) la hauteur à laquelle il est possible de porter le remblai en seconde étape (étude en rupture circulaire). Il faut essayer plusieurs valeurs de H jusqu'à obtenir $F_s = 1,5$. On négligera l'augmentation du degré de consolidation de la première étape. Peut-on terminer l'ouvrage en deux étapes ?

7. Calculer la résistance au cisaillement sous la deuxième tranche de remblai, après 80 % de consolidation. Peut-on alors terminer l'ouvrage ?

Si vous n'avez pas pu terminer l'ouvrage en 2 étapes, peut-on alors le terminer en 3 étapes ?

II - ÉTUDE DU TEMPS DE CONSTRUCTION

1. Calculer le coefficient de consolidation vertical apparent c_{va} de la couche compressible à l'aide de la relation d'Absi :

coefficient de consolidation apparent :
$$c_{va} = \frac{\left(\sum_i h_i \right)^2}{\left(\sum_i \frac{h_i}{\sqrt{c_{vi}}} \right)^2}$$

2. La couche compressible est soumise à un drainage sur chacune de ses faces.

2 - a Calculer le temps à attendre pour monter la deuxième étape en retenant 80 % de consolidation entre chaque étape.

2 - b En explicitant la définition du degré de consolidation ($U = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\sigma}$) calculer le temps à attendre pour monter la troisième étape, U de la première étape continuant cette fois à évoluer et en retenant toujours 80 % de consolidation global.

On rappelle que pour $U > 53\%$, $T_v = 1,781 - 0,933 \lg(100 - U_v)$.

3. Pour accélérer la consolidation, il est décidé de réaliser un réseau de drains plats géosynthétiques de rayon équivalent à 5 cm suivant un maillage triangulaire de 2 m. On admettra que le diamètre d'influence D est égal au côté du maillage L.

Un essai de pompage à charge constante réalisé en place a permis déterminer le coefficient de consolidation horizontale : $c_h = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

En prenant pour valeur du coefficient de consolidation radiale c_r , la valeur c_h et le coefficient de consolidation verticale calculé à la 1^{ère} question et en essayant plusieurs valeurs de t, déterminer quel est le temps nécessaire pour passer de la première à la seconde étape (avec $U_{\text{global}} = 80\%$) ?

Donner un ordre de grandeur du temps nécessaire pour édifier le remblai.

ANNEXES

Annexe n°1 : Tableau des valeurs de X, Y, Z et T

Annexe n°2 : Coupes types retenues pour les calculs

Annexe n°3 : Tassement immédiat pour $v = 0,5$ d'après GIROU

Annexe n°4 : Coefficient correcteur μ de BJERRUM

Annexe n°5 : Abaque de stabilité : remblai sans banquette

Annexe n°6 : Abaque de stabilité : remblai équipé de banquettes latérales

Annexe n°7 : Abaque d'Österberg

Annexe n°8 : Abaques pour consolidation radiale

ANNEXE 1

TABLEAU DES VALEURS DE X, Y, Z, T et I_p

Binôme	X : hauteur du remblai (*)	Y : largeur de la plate-forme	Z : indice de compression c_c de la couche 1	T : indice de compression c_c de la couche 2	$I_{p(\text{moyen})}$ (kPa)
1	5,5	22	1,06	2,3	65
2	5,5	24	1,06	2,1	75
3	5,5	24	1,10	2,3	85
4	5,5	26	1,06	2,1	65
5	5,5	26	1,10	2,3	75
6	6,0	22	1,06	2,1	85
7	6,0	22	1,10	2,3	65
8	6,0	24	1,06	2,1	75
9	6,0	24	1,10	2,3	85
10	6,0	26	1,06	2,1	65
11	6,0	26	1,10	2,3	75

(*) : au-dessus du terrain naturel initial

ANNEXE 2

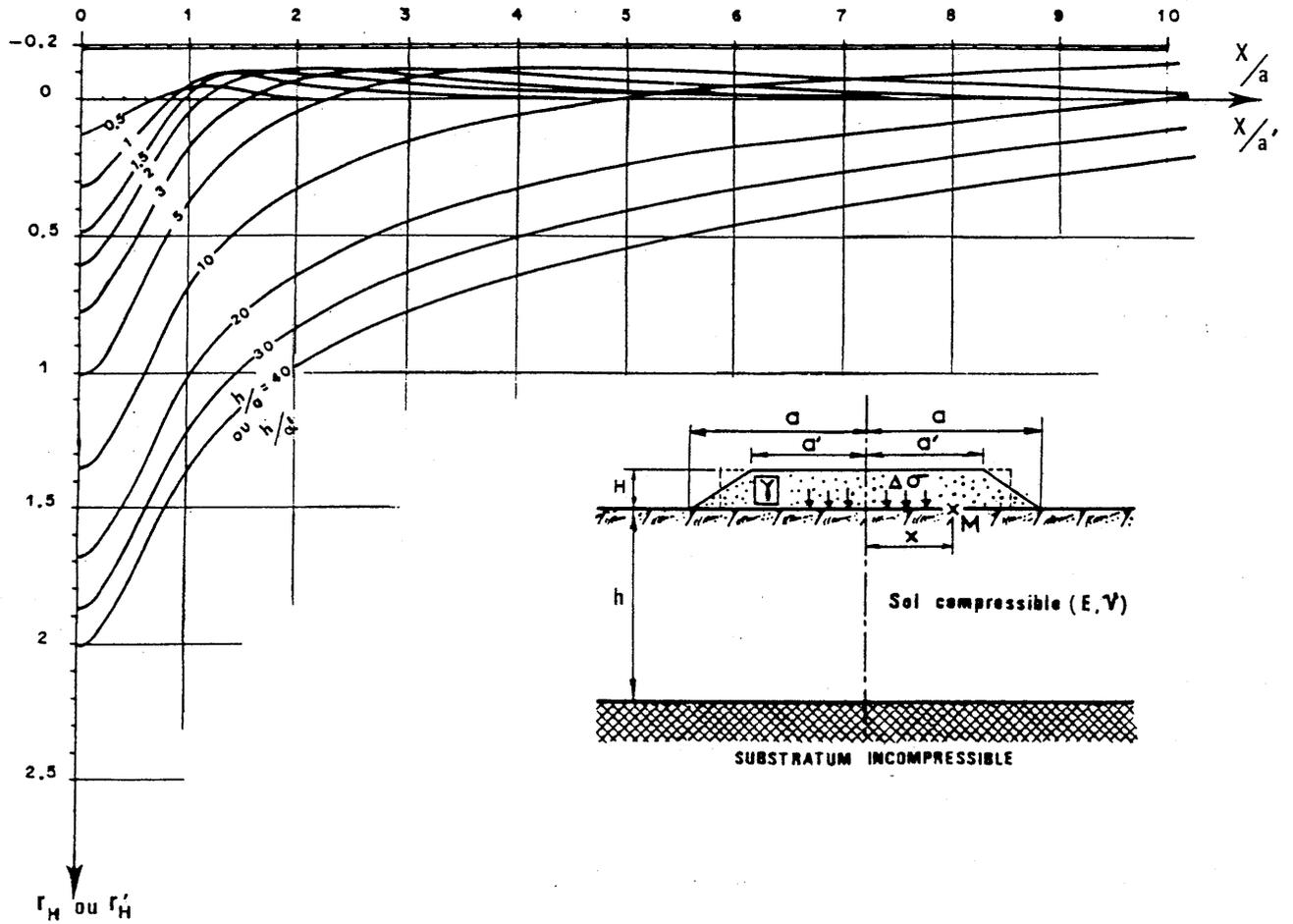
COUPES TYPES RETENUES POUR LES CALCULS

Couche	Profondeur (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	$\tan \lambda$	e_0	σ'_p (kPa)	c_s	c_c	c_v (10 ⁻⁸ m ² /s)
1	0 - 4	14,6	35	0,249	2,5	60	0,1	Z	8
2	4 - 9	13,75	30	0,249	4,0	65	0,2	T	8
3	9 - 14	13,7	40	0,249	2,2	100	0,1	0,93	25

La nappe phréatique est à 3,5 m sous la surface du sol.

ANNEXE 3

ABAQUE DE CALCUL DU TASSEMENT IMMÉDIAT, POUR $\nu = 0,5$
 (Tables pour le calcul des fondations - Tome 2 - J.P. Giroud - Dunod, 1973)



Le tassement est donné par :

$$s_i = \frac{\gamma \cdot H}{E} \cdot \frac{a^2}{a-a'} \left[r_H - \left(\frac{a'}{a} \right)^2 \cdot r'_H \right]$$

avec : $r_H = f \left(\frac{x}{a}, \frac{h}{a} \right)$

$r'_H = f \left(\frac{x}{a'}, \frac{h}{a'} \right)$

ANNEXE 4

FACTEUR DE CORRECTION μ DE LA COHÉSION NON DRAINÉE c_u^1
(d'après Bjerrum, 1973)

L'étude de divers cas de rupture de remblais montre que la valeur du coefficient de sécurité, calculé en rupture circulaire à partir de la cohésion non drainée mesurée au scissomètre de chantier, montre que cette valeur est parfois très éloignée de la valeur réelle $F = 1$ correspondant à la rupture.

Bjerrum a mis en évidence que la valeur du coefficient de sécurité, calculé au moment de la rupture comme indiqué ci-dessus, était d'autant plus surestimée que la plasticité des sols de fondation était plus élevée. Le diagramme $F = f(I_p)$ fait apparaître cette corrélation (fig. 1).

La mesure au scissomètre de la cohésion du sol de fondation est l'une des causes du désaccord entre le calcul et l'observation. La valeur de c_u ainsi fournie ne représente pas systématiquement la valeur moyenne de la cohésion non drainée mobilisée lors de la rupture du sol de fondation sous un remblai.

Compte-tenu du caractère peu intrinsèque des caractéristiques non drainées des sols fins, la valeur de c_u dépend largement des conditions dans lesquelles le sol a été sollicité au cours de l'essai qui a fourni cette valeur.

Il est très intéressant de connaître le coefficient correcteur à appliquer, par exemple, au résultat de l'essai scissométrique, pour trouver la valeur moyenne de c_u mobilisée sous un remblai.

La figure 2 permet d'évaluer le coefficient correcteur $\mu(I_p)$ tel que :

c_u mobilisée sous le remblai =

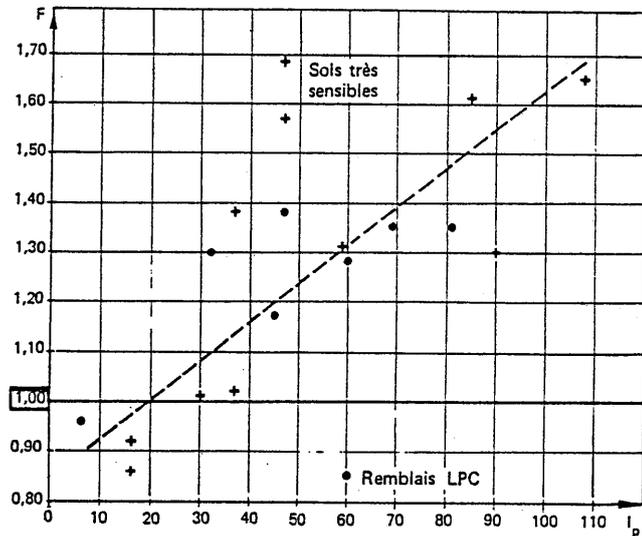
$$c_u \text{ scissomètre} \cdot \mu(I_p)$$

En fait, il existe deux facteurs principaux qui influencent c_u : l'anisotropie et la vitesse d'essai. Une corrélation plus détaillée devrait s'écrire :

$$c_u \text{ mobilisée} = c_u \text{ scissomètre} \cdot \mu_R \cdot \mu_A$$

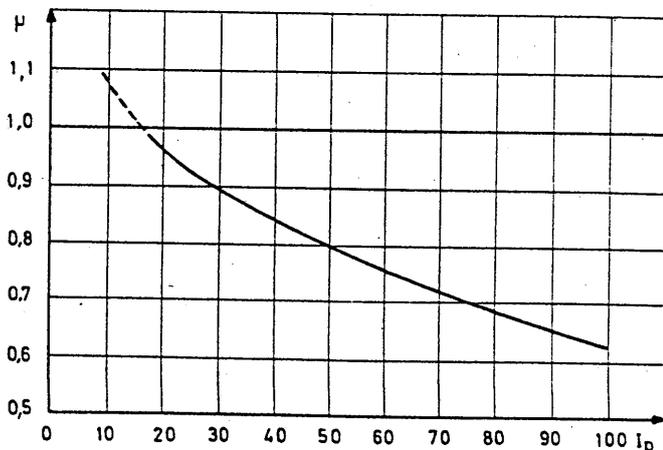
μ_R : facteur correctif tenant compte de la vitesse d'essai

μ_A : facteur correctif tenant compte de l'anisotropie



Relation entre le coefficient de sécurité calculé et l'indice de plasticité du sol de fondation pour différentes ruptures de remblais sur sols mous

- Figure 1 -



Coefficient correcteur $\mu(I_p)$ à appliquer à la valeur de la cohésion non drainée mesurée au scissomètre

- Figure 2 -

¹ Le texte en italique présente les observations qui sont à l'origine du coefficient minorateur $\mu(I_p)$ ainsi que les principaux facteurs qui influencent ce dernier.

Incidence de la vitesse d'essai

Il y a une différence considérable entre le temps mis pour mobiliser la résistance au cisaillement, d'une part, lors de l'essai scissométrique et, d'autre part, sous un remblai monté jusqu'à la rupture. Le rapport est de l'ordre de 10^4 à 10^5 . Les mesures de c_u en fonction de la durée du cisaillement (essais U.U. à l'appareil triaxial) donnent des valeurs d'autant plus faibles que le temps d'essai est plus long. Les réductions peuvent atteindre le tiers ou la moitié de la valeur initiale.

Incidence de l'anisotropie de c_u

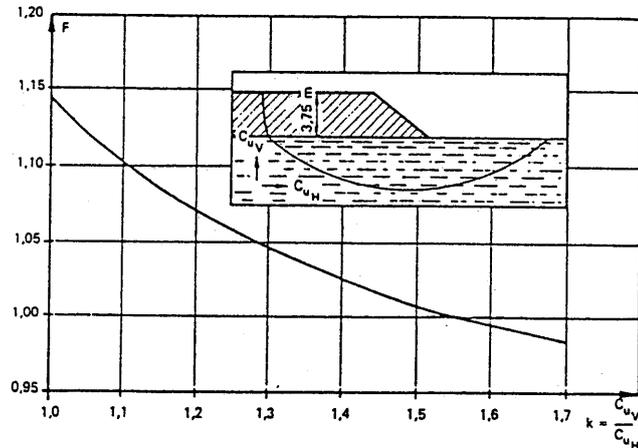
Elle intervient à deux titres sur la valeur du coefficient de sécurité F

- le sol peut présenter une anisotropie naturelle
- la surface de rupture met plus ou moins en relief ce caractère anisotrope.

La figure 3 montre pour une surface de rupture non circulaire la variation du coefficient de sécurité F en fonction de l'anisotropie de c_u

$$(k = \frac{c_{uV}}{c_{uH}}).$$

F passe de 1,14 à 0,94 lorsque que k varie de 1 à 2. L'effet est plus marqué aux petites valeurs de k .



Influence de l'anisotropie de résistance au cisaillement sur le coefficient de sécurité

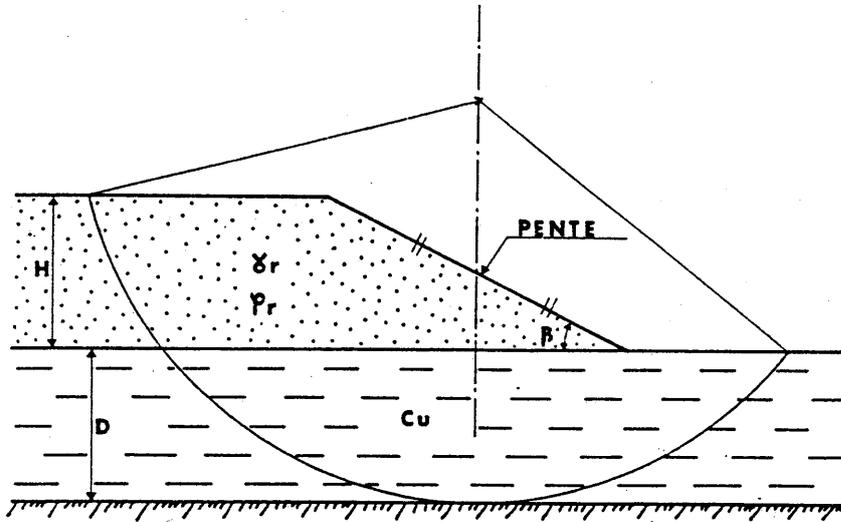
- Figure 3 -

ANNEXE 5

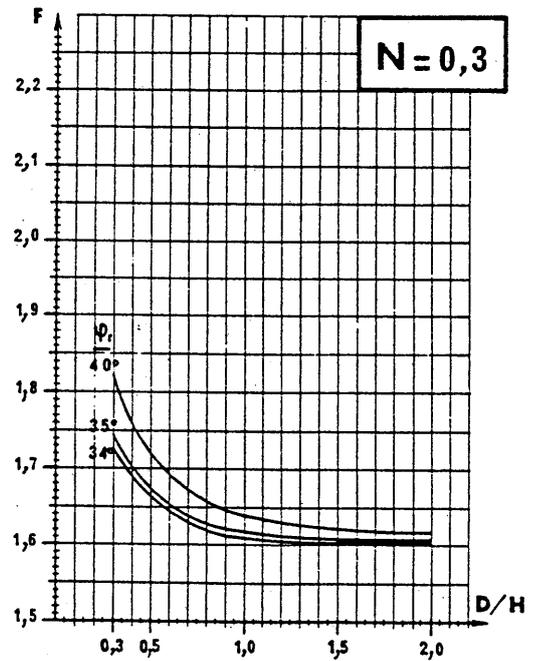
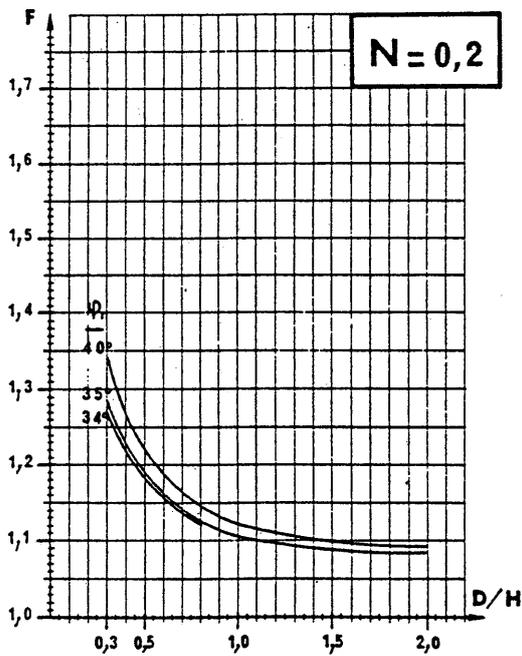
ABAQUE DE STABILITÉ

Remblai sans banquette latérale. Matériau de remblai purement frottant

($\frac{c_r}{c_u} = 0$). Pente 2/3 (d'après Pilot et Moreau, 1973)



Facteur de stabilité (Nombre de Taylor) $N = \frac{c_u}{\gamma_r \cdot H}$



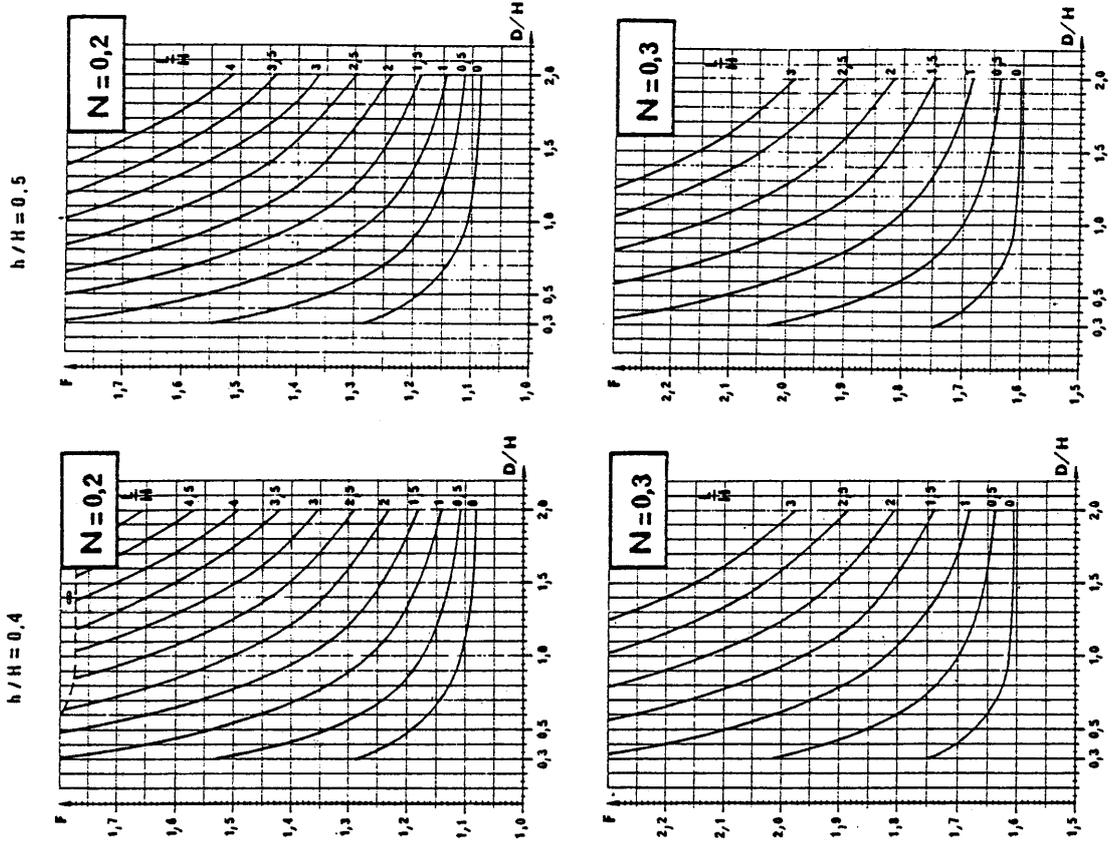
ANNEXE 6

ABAQUE DE STABILITÉ

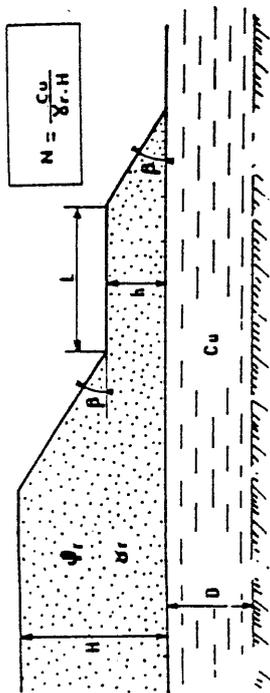
Remblai équipé de banquettes latérales.

Pente remblai et banquette : 2/3. $\phi_r = 35^\circ$ (d'après Pilot et Moreau, 1973)

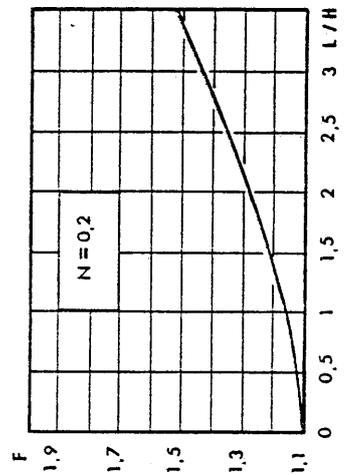
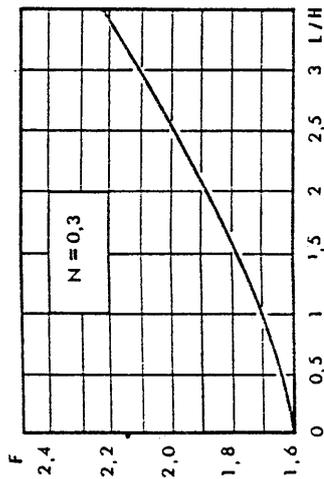
Question 6 - c



Question 6 - b

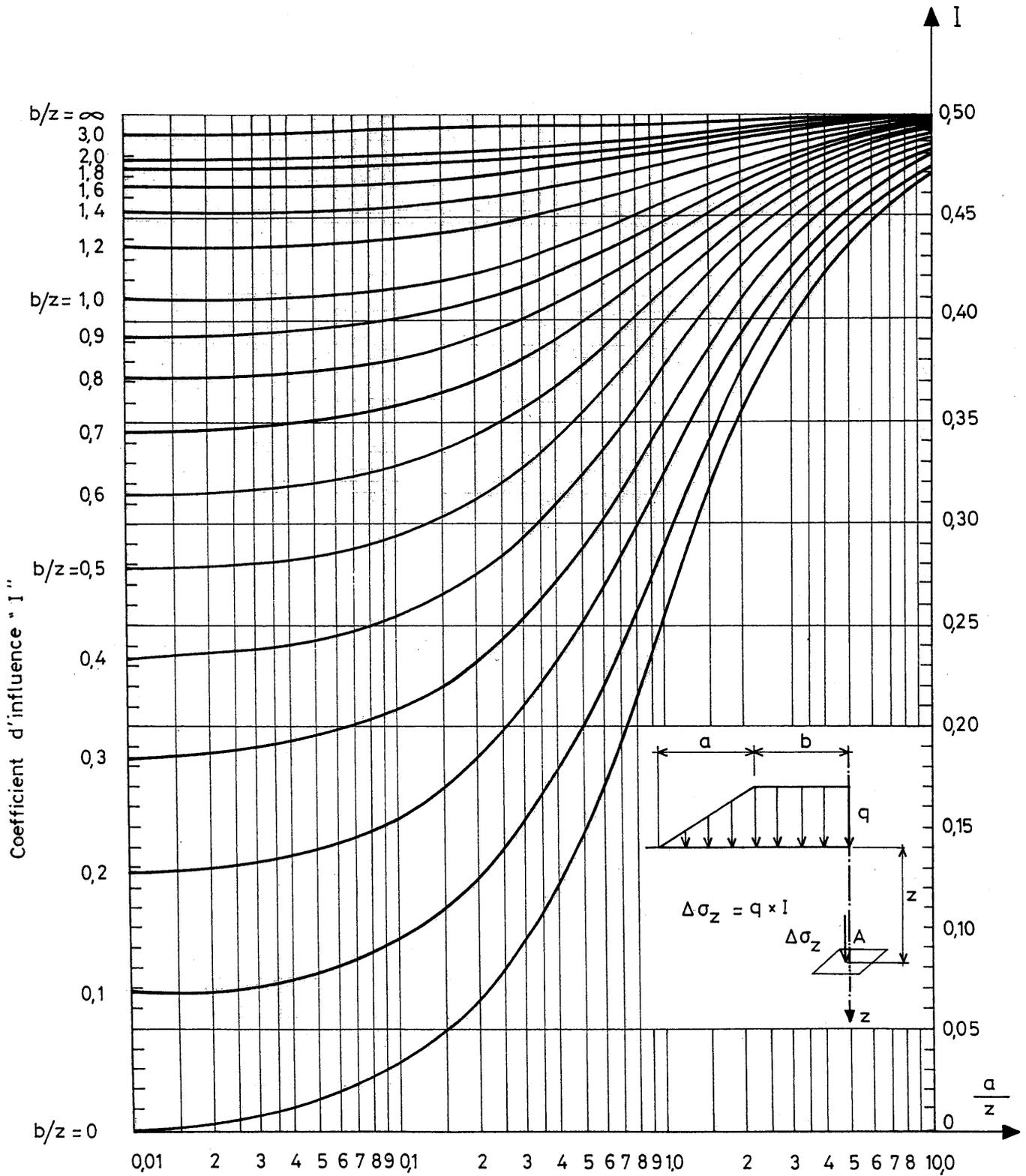


ABAQUES POUR $D/H = 1.6$ ET $h/H = 0.4$



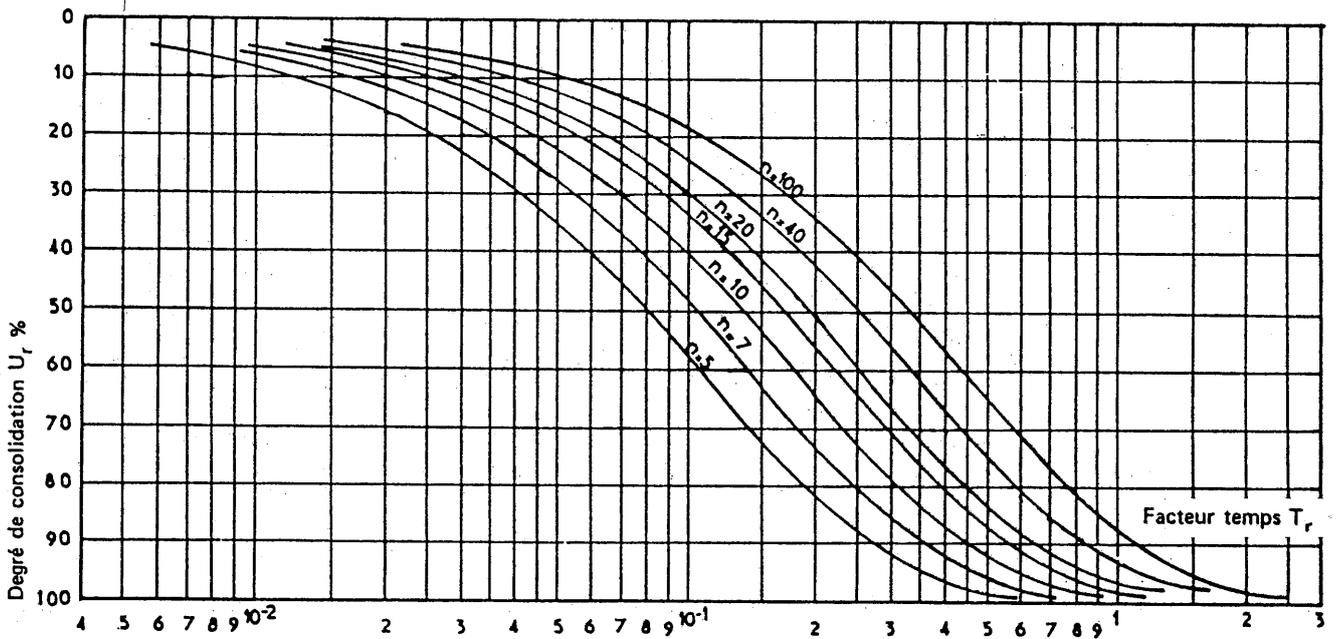
ANNEXE 7

Abaque d'ÖSTERBERG



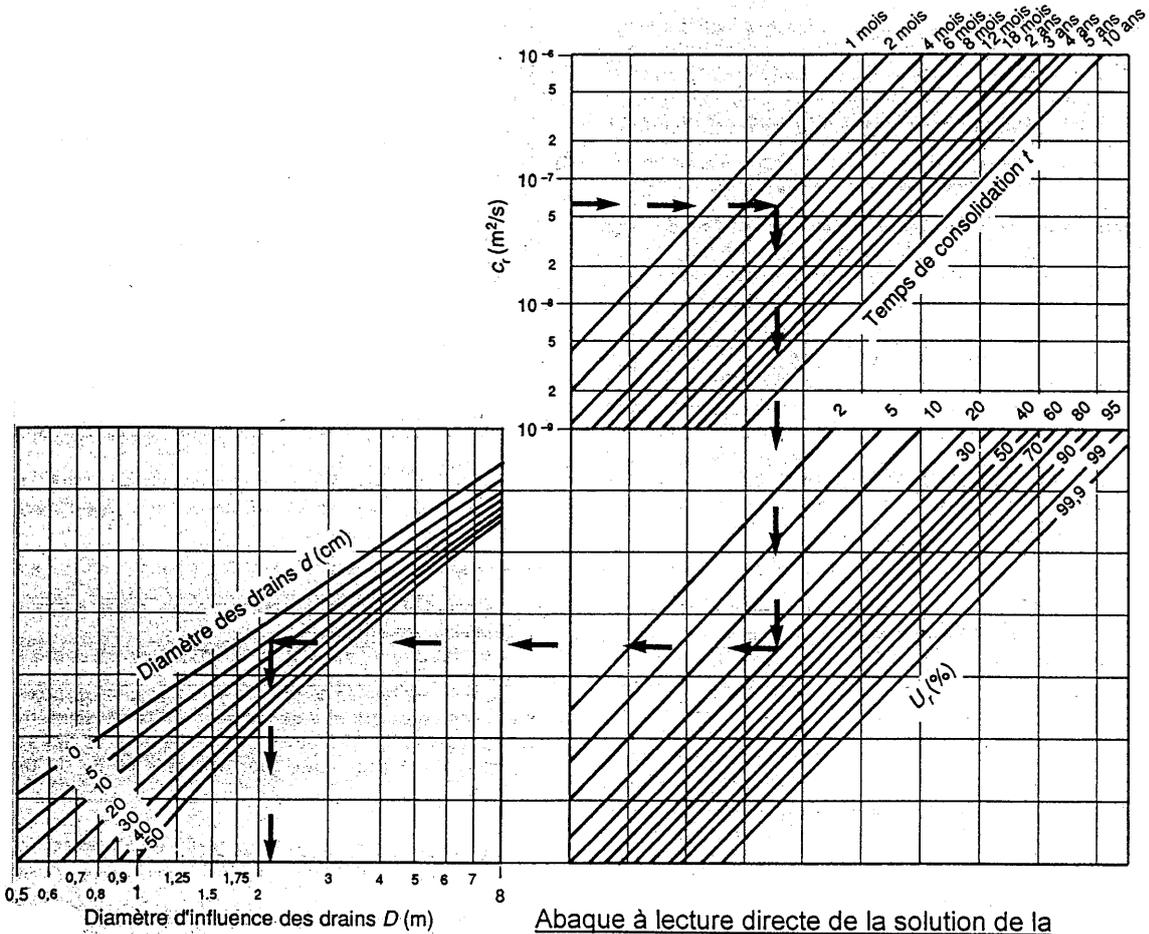
ANNEXE 8

CONSOLIDATION RADIALE



Degré de consolidation U_r en fonction de T_r et de $n = \frac{D}{d}$

(nécessite des essais successifs)



Abaque à lecture directe de la solution de la théorie de la consolidation radiale de Barron