

AURIAULT J.L. et CORDARY D.

I.M.G., Université de Grenoble, France

GIROUD J.P. et GOURC J.P.

I.R.I.G.M., Université de Grenoble, France

Etude théorique du rôle des drains textiles dans la consolidation des remblais

Theoretical study of the importance of fabric drains in earthfill consolidation

Some fabrics, particularly some non-woven ones, are able to convey water in their plane. Therefore they can act as drains when used in a saturated soil. This will increase the rate of the consolidation process of the soil, hence will increase the rate of settlement. This paper deals with the theoretical treatment of the consolidation of a fill made of horizontal layers of soil separated by fabrics. The calculations are made with the assumption that the height of the fill is small as compared to its width. Equations governing this phenomenon are written for two different cases : (1) the thickness of the draining textile is assumed to be constant ; (2) the compressibility of the textile is taken into account. The numerical results obtained in the first case are given and discussed.

Les nappes de non-tissés peuvent avoir trois rôles dans un remblai : (1) couche anti-contaminante entre deux matériaux différents ; (2) armature pour augmenter les propriétés mécaniques globales du massif ; (3) drain pour accélérer la consolidation des couches de sol.

Nous nous intéresserons ici uniquement à ce troisième rôle. La première tentative de construction d'un remblai faisant alterner couches de sol et nappes de textile non tissé a été faite en France à Rouen [1] : le rôle de drain du textile a alors été mis en évidence. Ceci différencie donc bien ce procédé de la technique de la Terre Armée dont les armatures métalliques ne peuvent conduire l'eau, ce qui la destine plus particulièrement aux sols drainants. À l'inverse, les non-tissés, qui jouent un rôle mécanique moins important que les armatures métalliques, permettent de réaliser des remblais avec des sols saturés de faible perméabilité dont les propriétés vont s'améliorer au cours du temps sous l'effet du poids des terres susjacentes. C'est ce problème de consolidation que nous étudions.

1 ETUDE THEORIQUE

Considérons un remblai dont la largeur est grande vis-à-vis de l'épaisseur. Ainsi, nous pouvons raisonnablement supposer que, sauf peut-être sur les bords du remblai, l'écoulement d'eau est vertical. Enfin, nous supposons la longueur du remblai assez grande pour ne pas intervenir dans le calcul.

Les nappes de textile non tissé sont disposées horizontalement et à une distance verticale $2H$ les unes des autres. Chaque nappe peut ainsi collecter l'eau qui s'écoule du sol soit par gravité, soit sous l'effet de la consolidation et la transporter dans son plan suivant une direction parallèle à la largeur du remblai. Il est donc nécessaire de connaître la perméabilité du textile, k_t , suivant cette direction, valeur qui, compte tenu de l'anisotropie ne peut être obtenue à partir d'un essai dans un appareil à écoulement radial : c'est la raison pour laquelle nous sommes en train de mettre au point un appareil pour mesurer la perméabilité dans une seule direction. Bien entendu, dans le remblai, on a intérêt à faire coïncider la direction de perméabilité maximale avec la direction de l'écoulement.

Nous étudions une couche de sol d'épaisseur $2H$, comprise entre deux nappes de textile, sur une demi largeur uniquement, le remblai étant supposé symétrique (Fig. 1).

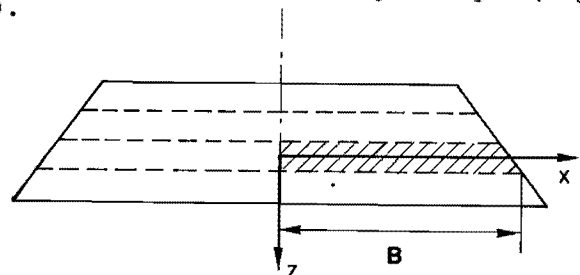


Fig. 1 - Section du remblai. En gris, la demi-couche étudiée

L'axe vertical descendant z est l'axe de symétrie du remblai, l'axe x est horizontal et passe par le milieu de la couche considérée (Fig. 2).

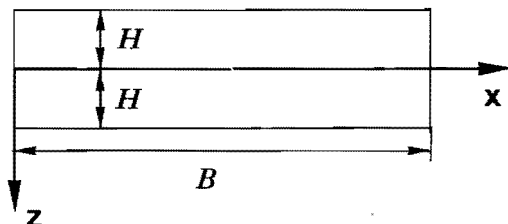


Fig. 2 - La demi-couche étudiée (Fig. 1) est assimilée à un rectangle dans le calcul qui suit.

Nous appellerons $2B$ la largeur maximale de cette couche et e l'épaisseur du textile. On fait pour le sol les hypothèses suivantes : (1) sa loi de comportement est élastique, linéaire et isotrope ; (2) il est saturé de fluide incompressible (cette hypothèse est bien sûr la plus défavorable quant à la durée de la consolidation) ; (3) sa perméabilité peut être considérée comme constante dans le temps.

A tout moment et en chaque point, nous supposons vérifiée la relation :

$$\sigma = \sigma' + u$$

où σ représente le tenseur des contraintes totales ;

σ' le tenseur des contraintes effectives ;

u le tenseur de la pression interstitielle.

Nous appellerons $\bar{\sigma}$, $\bar{\sigma}'$ et \bar{u} les accroissements de ces quantités à partir de l'état initial d'équilibre. On aura donc également :

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}' + \bar{u}$$

Nous supposons que la consolidation de la couche résulte de son chargement par les couches supérieures (Ici nous admettons qu'elles sont construites très rapidement pour pouvoir représenter le phénomène par un chargement instantané ; si dans la réalité ce n'était pas le cas, cela signifierait que la consolidation aurait déjà commencé avant la fin de la construction, ce qui serait plus favorable que le calcul qui suit). Avant le chargement, pour un point quelconque de la couche, nous avons :

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \gamma z \\ \sigma'_{zz} &= \gamma' z \\ u &= \gamma_w z \end{aligned}$$

où γ est le poids volumique apparent du sol ;

γ' le poids volumique du sol déjaugé ;

γ_w le poids volumique de l'eau.

Après le chargement, nous avons :

$$\sigma_{zz} = \gamma z + \bar{\sigma}'_{zz}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{zz} &= \gamma' z + \bar{\sigma}'_{zz} \\ u &= \gamma_w z + \bar{u} \end{aligned}$$

Les hypothèses faites (H petit par rapport à B) permettent de considérer $\bar{\sigma}'_{zz}$ comme homogène et principale sauf bien entendu au voisinage des bords. Dans ces conditions, l'écoulement obéit à l'équation classique de la consolidation unidimensionnelle, le module oedométrique E'_{oeds} du sol et sa perméabilité k_s restant constants.

Soit

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = C_{vs} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (1)$$

Avec

$$C_{vs} = \frac{k_s E'_{oeds}}{\gamma_w}$$

Étudions maintenant l'écoulement dans le textile en supposant qu'il satisfait à la formule de Darcy :

$$\vec{v}_t = -k_t \text{grad } h$$

avec \vec{v}_t : vitesse au sens de Darcy, dans le textile ;

h : charge hydraulique

k_t : coefficient de perméabilité du textile dans la direction de l'écoulement (ce coefficient dépend suffisamment peu de la contrainte de compression exercée sur le textile pour qu'il soit logique de le prendre constant dans le calcul.)

On montre aisément qu'en négligeant l'énergie cinétique acquise par le fluide, on a :

$$h = \frac{\bar{u}}{\gamma_w}$$

Considérons alors une tranche de textile de longueur dx , de largeur L quelconque, perpendiculaire à la direction x , c'est-à-dire à la direction de l'écoulement. (Fig. 3 page suivante)

a) Textile dont l'épaisseur reste invariable dans le temps

Nous nous intéressons au textile situé à la base de la couche, c'est-à-dire correspondant à z positif. Seule la demi-épaisseur supérieure de cette nappe reçoit de l'eau de la demi-couche de sol supérieure et ceci par raison de symétrie. Comme l'écoulement est parallèle à l'axe des x et de même sens, on a :

$$v_t = -\frac{k_t}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

Le débit d'eau qui traverse la demi-section (I) s'écrit :

$$Q_t = v_t \times \frac{e}{2} \times L = -\frac{k_t e L}{2 \gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

La variation de débit de la demi-section (I) à la demi-section (II) devient :

$$dQ_t = \frac{\partial Q_t}{\partial x} dx = -\frac{k_t e L}{2 \gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} dx$$

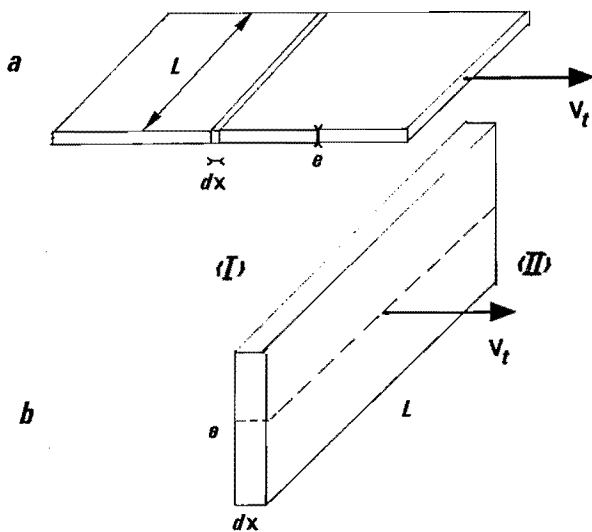


Fig. 3 - a) Tranche d'épaisseur dx dans la nappe de textile ;
 b) détail de la tranche : l'eau s'écoule dans le textile de la gauche vers la droite, pénètre dans la tranche considérée par la section (I) et en sort par la section (II).

Mais cette variation de débit résulte de l'apport d'eau, traversant la face supérieure, que l'on peut évaluer à partir de la vitesse d'écoulement dans le sol, c'est-à-dire :

$$\vec{v}_s = -k_s \overrightarrow{\text{grad } h}$$

Comme dans le sol, l'écoulement est parallèle à l'axe z et de même sens (pour $0 \leq z \leq H$) on a :

$$v_s = -\frac{k_s}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

Ce qui, à travers la face supérieure, correspond à un débit :

$$dQ_t = -\frac{k_s}{\gamma_w} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{z=H} dx \times L$$

En identifiant les deux expressions de dQ_t , on obtient :

$$k_t e \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} = 2 k_s \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2) \quad \text{pour } z = H$$

Le problème est ainsi complètement résolu par le couplage des équations (1) et (2)

b) Textile dont l'épaisseur est variable dans le temps

En toute rigueur, l'épaisseur du textile varie avec la contrainte effective qui lui est appliquée. Or celle-ci varie dans le temps puisque la pression interstitielle varie elle-même. On peut donc écrire :

$$e = f(\sigma') = g(\bar{u})$$

En outre, le bilan hydraulique est également modifié puisque la diminution de e entraîne un départ d'eau supplémentaire. On aura donc :

$$dQ_t = -\frac{k_s}{\gamma_w} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{z=H} dx - \frac{1}{2} \frac{\partial (e L dx)}{\partial t}$$

On obtient donc :

$$k_t e \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} = 2 k_s \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \gamma_w \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2\text{bis})$$

pour $z = H$

avec $e = g(\bar{u}) = f(\sigma')$
 $f(\sigma')$ étant déduite d'essais de compression sur le textile

On voit immédiatement que l'équation (2 bis) est beaucoup plus complexe que l'équation (2) et de ce fait beaucoup plus difficile à résoudre. Mais, par ailleurs, si le textile était sec au moment de la mise en place du remblai, sa compression serait immédiate ; cette hypothèse est en fait peu probable. Toutefois sa perméabilité est toujours suffisamment grande pour que l'on puisse admettre que la plus grande partie de la variation de e va se faire de manière quasi instantanée au moment où la nappe est recouverte du matériau du remblai : ce phénomène sera d'autant plus accentué que la nappe est initialement non saturée. Néanmoins, dès que le processus de consolidation du remblai commence, la variation de la contrainte effective est conditionnée par le phénomène d'ensemble que nous décrivons avec les équations (1) et (2 bis). C'est donc dans cette phase que le textile va finir, très lentement cette fois-ci, de se comprimer. Si l'on néglige cette variation d'épaisseur au cours du temps, on introduit un élément pessimiste dans le calcul des durées de consolidation dès lors que l'on prend pour épaisseur du textile la valeur e correspondant à la contrainte effective finale, c'est-à-dire à une surpression interstitielle \bar{u} nulle, soit : $e = g(0)$. Avec cette hypothèse, en effet, l'eau dispose de moins d'espace pour s'écouler que dans la réalité ; il convient tout de même de remarquer que cette façon de faire a pour conséquence de négliger le volume d'eau correspondant à la diminution d'épaisseur du textile, volume d'eau que le drain doit évacuer et qui intervient dans le temps de consolidation, mais vraisemblablement pour une faible part. Dans ces conditions, si l'on veut obtenir des valeurs du temps de consolidation calculées qui ont toutes chances d'être supérieures aux temps réels, il faudra prendre soin d'introduire dans le calcul la valeur de la perméabilité du textile, k_t , suivant l'axe x , correspondant à la contrainte effective qui lui est appliquée en fin d'évolution. Dans ces conditions, il nous faut résoudre le système suivant :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = c_{vs} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}$$

$$k_t e \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} = 2 k_s \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \text{pour } z = H$$

sur le domaine $0 \leq x \leq B$
 $0 \leq z \leq H$

en choisissant pour k_t la valeur correspondant à la fin de l'évolution de la compression du textile. Les équations sont homogènes, les conditions aux limites suivantes aussi :

$$\begin{aligned} \bar{u}(B, z, t) &= 0 \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}(x, 0, t) &= 0 \text{ car } x = 0 \text{ est un axe de symétrie} \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}(0, z, t) &= 0 \text{ car } z = 0 \text{ est un axe de symétrie} \end{aligned}$$

Seule la condition initiale $\bar{u}(x, z, 0) = \bar{\sigma}$ pour $x < B$ ne l'est pas. Le domaine étant rectangulaire, on peut chercher la solution sous la forme d'un développement en série de fonctions propres en utilisant la technique de séparation des variables. On obtient ainsi :

$$\frac{\bar{u}(x, z, t)}{\bar{\sigma}} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{16(-1)^n \sin(H\lambda_{pn}^{1/2})}{(2n+1)\pi(2H\lambda_{pn}^{1/2} + \sin(2H\lambda_{pn}^{1/2}))} \times \cos\left(\frac{2n+1}{2B}\pi x\right) \cos\left(\lambda_{pn}^{1/2} z\right) e^{-C_{vs}\lambda_{pn} t} \quad (3)$$

où les valeurs propres λ_{pn} sont les solutions, classées en p par ordre croissant, de l'équation :

$$(4) \lambda^{1/2} \operatorname{tg}(\lambda^{1/2} H) = \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{8} \frac{ek_t}{B^2 k_s}$$

(avec donc $\lambda_{in} < \lambda_{i+1n}$; on voit que si p tend vers l'infini, $\lambda^{1/2} H$ tend vers $p\pi + \frac{\pi}{2}$ quel que soit n .)

Cette solution peut être exploitée pratiquement à l'aide d'un calcul très simple sur ordinateur.

L'étude que nous venons de faire sur une couche de matériau entre deux nappes de textile a déjà été abordée par BOURDILLON [2] qui a fait d'autres hypothèses sur l'écoulement et a résolu les équations obtenues à l'aide d'une méthode numérique de différences finies. Avant de comparer nos résultats à ceux qu'il a proposés, insistons sur le caractère analytique de la solution donnée ici, caractère qui rend très simple son adaptation à toutes sortes de cas.

2 EXEMPLES DE CALCUL

Nous reprendrons les exemples traités par BOURDILLON, c'est-à-dire :

Exemple 1 : une couche de limon ($k_s = 10^{-8}$ m/s, $c_{vs} = 10^{-6}$ m²/s) de 2 m d'épaisseur ($H_{vs} = 1$ m) et de longueur 30 m ($B = 15$ m) est soumise à une contrainte finale de 2 bars. Le textile utilisé qui est le Bidim U 64 a, sous cette contrainte de compression, une épaisseur de 22 mm et une perméabilité $k_t = 3 \times 10^{-4}$ m/s. Les résultats sont donnés sur la figure 4 pour l'axe de symétrie du remblai et, comparés

à ceux que l'on obtiendrait si l'on remplaçait le textile par un drain parfait, c'est à dire un drain dans lequel \bar{u} est nul en tout point, et ceci pour deux épaisseurs de couche: $H = 1$ m et $H = 5$ m.

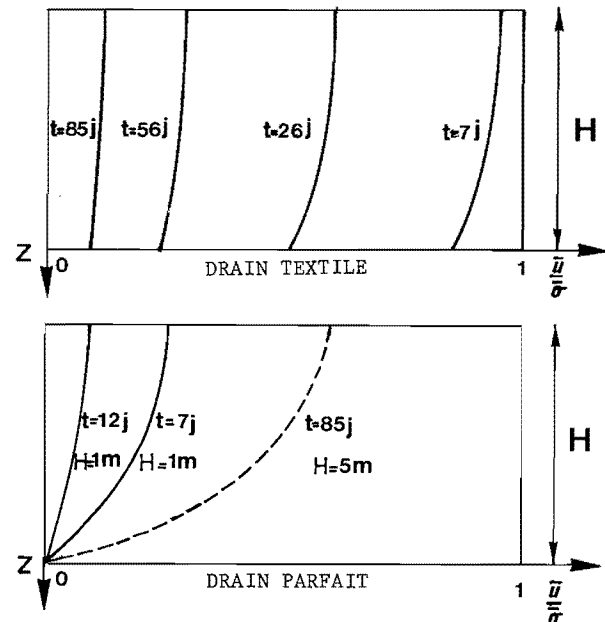


Fig. 4 - Consolidation d'une couche de limon d'épaisseur $2H = 2$ m (seule la demi-couche inférieure est représentée) ($B = 15$ m, $ek_t / k_s = 66$ m, $c_{vs} = 10^{-6}$ m²/s) (a) Drains en textile ; (b) Drains parfaits (sur ce dernier graphique, pour les courbes en trait plein, H vaut 1 m, demi-épaisseur de la couche de limon, et, pour la courbe en tirets, H vaut 5 m, demi-épaisseur d'une couche de 10 m de limon entre drains parfaits présentée à titre de comparaison)

Exemple 2 : On étudie une couche d'argile ($k_s = 10^{-10}$ m/s, $c_{vs} = 10^{-7}$ m²/s) dans les mêmes conditions. Les résultats sont donnés sur la figure 5 pour l'axe de symétrie du remblai et comparés à ceux que l'on obtiendrait si la couche considérée était entre deux drains parfaits. Les résultats sont tout-à-fait conformes à ceux obtenus par BOURDILLON, ce qui montre que l'hypothèse d'écoulement bidimensionnel qu'il a adoptée est à peu près sans influence sur les résultats concernant la section médiane du remblai. On constate que, pour la couche argileuse, le textile agit à peu de choses près comme un drain parfait. Pour le limon, les pressions interstitielles dans le textile et au milieu de la couche sont très voisines ; le système est alors beaucoup moins efficace que des drains parfaits dans les mêmes conditions, mais beaucoup plus efficace que ne le seraient ces mêmes drains placés à distance cinq fois plus grande. Ceci compte tenu de la difficulté et du coût de réalisation de drains parfaits est tout de même très intéressant.

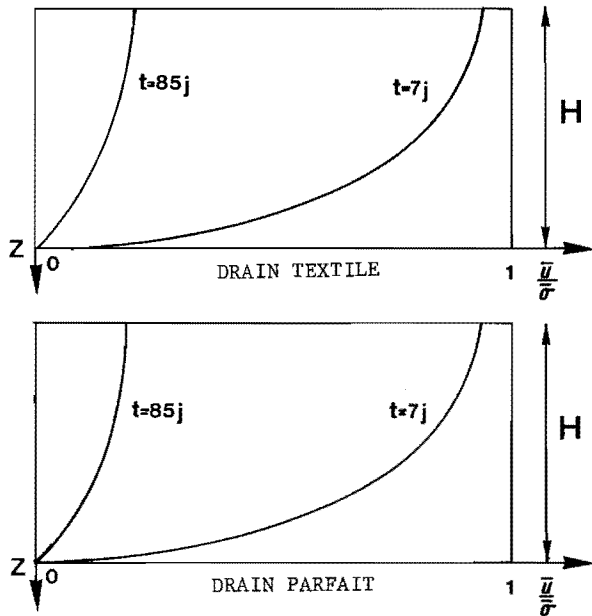


Fig. 5 - Consolidation d'une couche d'argile d'épaisseur $2H = 2$ m (seule la demi-couche inférieure est représentée) ($B = 15$ m, $e k_t / k_s = 6600$ m, $c_{vs} = 10^{-7}$ m²/s) (a) Drains en textile ; (b) Drains parfaits.

Enfin, nous avons représenté sur les figures 6, 7 et 8 l'influence des paramètres e , B et H sur les durées de consolidation d'une couche de limon, calculées sur l'axe de symétrie du remblai. Les équations (3) et (4), qui expriment la solution, montrent que les paramètres e , k_t et k_s n'interviennent que groupés sous la forme $e k_t / k_s$. Il est donc intéressant de faire apparaître la valeur de cette expression.

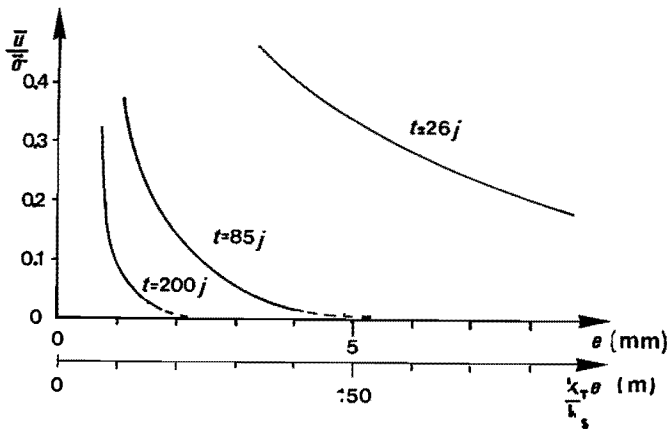


Fig. 6 - Influence de l'épaisseur, e , du textile sur la durée de consolidation dans le cas du limon ($B = 15$ m, $H = 1$ m, $c_{vs} = 10^{-6}$ m²/s, $k_t / k_s = 3 \cdot 10^4$)

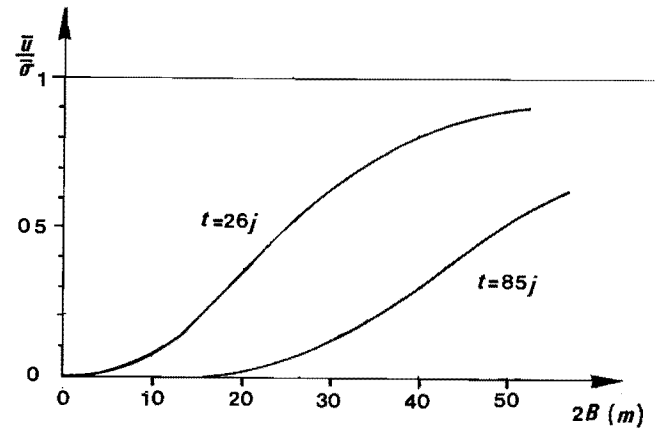


Fig. 7 - Influence de la largeur, $2B$, du remblai sur la durée de consolidation dans le cas du limon ($H = 1$ m, $e k_t / k_s = 66$ m, $c_{vs} = 10^{-6}$ m²/s)

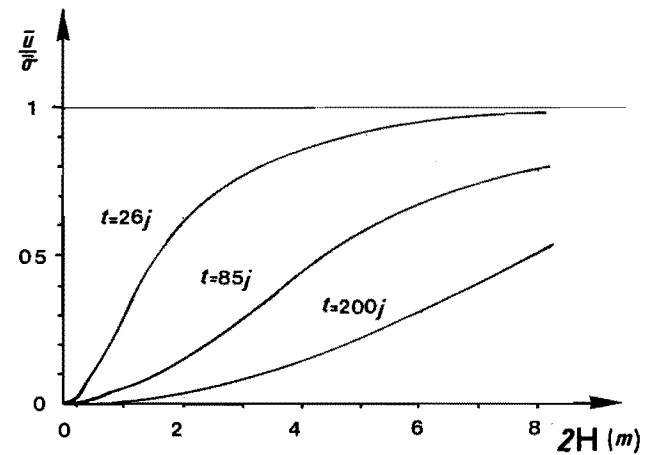


Fig. 8 - Influence de la distance $2H$ des nappes de textile dans le cas du limon ($B = 15$ m, $e k_t / k_s = 66$ m, $c_{vs} = 10^{-6}$ m²/s)

CONCLUSION

Compte tenu du caractère théorique de cette communication, il nous paraît utile d'en rappeler les grandes lignes.

Problème posé : Le sol saturé qui constitue le remblai se comprime sous le poids des couches supérieures à mesure que l'eau s'échappe grâce au textile qui joue le rôle de drain ; le but du calcul est de déterminer la vitesse de départ de l'eau, donc celle du tassement du remblai.

Paramètres : L'évolution est d'autant plus rapide que la distance entre nappes textiles est plus faible, la largeur du remblai (c'est-à-dire la longueur des drains) est plus faible, la perméabilité du sol et la transmissivité (perméabilité x épaisseur) du textile sont plus grandes.

Hypothèses : Le calcul est fait en supposant que la longueur du remblai est suffisamment grande pour ne pas intervenir (problème bidimensionnel) et que la distance entre nappes textiles est petite vis-à-vis de la largeur du remblai. Il est alors raisonnable de supposer que dans le sol du remblai l'écoulement est presque partout vertical. En outre, le module oedométrique du sol ainsi que les perméabilités du sol et du textile sont constants.

Ecriture des équations : Les équations du problème sont données dans deux cas : épaisseur du textile constante au cours de la consolidation et épaisseur du textile variable.

Méthode de calcul : Les solutions sont recherchées sous la forme de développement en série de fonctions propres en utilisant la technique de séparation des variables. Seules les équations correspondant à l'épaisseur du textile invariable dans le temps sont résolues ici. Remarquons à nouveau l'intérêt de ce type de solution, complètement analytique, ce qui permet une adaptation immédiate à tous les cas, contrairement aux solutions numériques.

Résultats : Les calculs numériques illustrent deux cas typiques de sols saturés, argile ($k_s = 10^{-10}$ m/s) et silt ($k_s = 10^{-8}$ m/s), avec, pour drain, un des textiles non-tissés les plus épais et les plus perméables disponibles actuellement (transmissivité égale à 6.6×10^{-6} m²/s). Le premier cas montre que, si le sol est une argile, le textile étudié agit comme un drain parfait. Le second cas montre que, si le sol est un silt, l'ensemble de drains textiles espacés de 2 m est moins efficace que des drains parfaits espacés de 2 m mais plus efficace que des drains parfaits espacés de 10 m. De plus, la comparaison de nos résultats avec ceux de BOURDILLON [2] montre que notre hypothèse restrictive de l'écoulement vertical dans le sol est justifiée, du moins pour la section médiane du remblai.

Rôle des paramètres géométriques : Pour le cas du silt, des graphiques permettent de mettre en évidence le rôle des paramètres géométriques, en particulier l'épaisseur du textile et l'écartement des nappes que l'utilisateur peut ainsi choisir.

PROLONGEMENTS

La suite logique de cette étude théorique est une vérification expérimentale.

Nous simulerons le comportement en consolidation d'un élément de remblai en disposant à l'intérieur d'une cuve parallélépipédique une nappe textile horizontale entre deux couches de sol saturé, et en soumettant l'ensemble à une charge verticale. Nous comptons faire varier les paramètres suivants : l'épaisseur du textile, l'épaisseur des couches de sol,

et le rapport de similitude du modèle en imposant sur les bords de la nappe une pression interstitielle $u(x, H, t)$ (formule 3) pour des valeurs de x différentes à chaque essai.

Ces expériences devraient nous permettre de discuter de la validité des hypothèses faites dans l'étude théorique, sur le type de consolidation (monodimensionnelle) et sur la conservation de la perméabilité du textile au cours du temps.

REFERENCES

[1] J. PUIG et J.C. BLIVET : "Remblai à talus vertical armé avec un textile synthétique", Bulletin Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 64, mars-avril 1973.

[2] M. BOURDILLON : "Utilisation des textiles non tissés pour le drainage : Application aux remblais de sols fins en cours de consolidation" Rapport de recherche n° 54, Laboratoire des Ponts et Chaussées