

BLIVET, J. C., Laboratoire des Ponts et Chaussées, Rouen, France

JOUVE, P. et MAILLOT, R., Université du Havre, France

MODELISATION NUMERIQUE DU RENFORCEMENT DES SOLS PAR GEOTEXTILES: FONCTION HYDRAULIQUE

NUMERICAL MODELIZATION OF EARTH REINFORCEMENT BY GEOTEXTILE: HYDRAULIC FUNCTION

NUMERISCHES MODELL FÜR BODENVERSTÄRKUNG MIT GEOTEXTIL: HYDRAULISCHE FUNKTION

Par un calcul aux éléments finis, on met en évidence les rôles tenus par des géotextiles utilisés en renforcement de sols fins saturés. Pour un sol de perméabilité donnée lors du renforcement d'un remblai à talus vertical, on détermine la transmissivité minimale que doit avoir le géotextile, afin d'éviter la genèse de surpression interstitielle dans la zone renforcée. De même, il est possible, dans le cas d'une accélération de la consolidation d'un sol fin, de dimensionner des nappes de géotextile, afin d'obtenir un pourcentage du tassement final à un temps fixé à l'avance.

With finite element calculation we give clear indication of hydraulic function of geotextiles used in reinforcement of saturated fine soils. For a given low permeability soil in an embankment we find the minimal transmissivity of a geotextil which avoids the growth of pore pressure in reinforced area. In the some way, it is possible to fix geotextil sheet characteristics which induce a given amount of final settlement at a given time.

INTRODUCTION

L'emploi des géotextiles en renforcement des sols est de plus en plus fréquent, soit pour construire des remblais avec des talus à forte pente, soit pour diminuer la poussée des terres sur les ouvrages classiques, soit pour réaliser des soutènements entièrement en sol + géotextile. Dans chaque cas, le renforcement est effectué par des nappes de grandes surfaces. Ceci constitue l'originalité fondamentale de cette technique de renforcement des sols ; aucun autre procédé, qui introduit des éléments résistants dans le sol, n'offre cette particularité. Sur le plan mécanique, cette grande surface de contact entre le renforcement et le sol permet la mobilisation d'efforts de traction importants même si le frottement unitaire reste faible. Ainsi, le domaine privilégié de ce procédé réside dans le renforcement des sols ayant de faibles caractéristiques mécaniques, c'est-à-dire principalement les sols fins proches de la saturation. Pour ce type de matériau, la mise en oeuvre en remblai se traduit souvent par une mise en pression de l'eau interstitielle, ce qui provoque une diminution de la résistance au cisaillement du sol et une plus faible mobilisation du frottement entre le sol et les éléments de renforcement (la résistance au cisaillement s'exprime par : $\tau = c' + (\sigma - u) \text{tg } \theta'$ où la contrainte totale dépend de la géométrie de l'ouvrage et u est la pression de l'eau interstitielle). Le premier rôle du géotextile, dans de tels matériaux, est donc de permettre une dissipation rapide des surpressions interstitielles, ce qui améliore la mobilisation du frottement interne et accélère la consolidation.

Le rôle hydraulique du géotextile est modélisé dans un calcul aux éléments finis où le sol est schématisé comme un élément biphasique : squelette et eau. Le couplage géotextile et sol biphasique permet de déterminer l'adéquation entre un sol de perméabilité donnée et un

géotextile de transmissivité donnée. Les résultats de ces calculs débouchent sur diverses applications : le renforcement mécanique des sols fins humides, l'accélération de la consolidation des sols par géotextile, le drainage latéral des chaussées, etc...

MODELISATION NUMERIQUE

Programme utilisé

Le travail présenté utilise le programme par éléments finis ROSALIE - Groupe 9 du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1) (2) et (3). En l'état actuel, il s'agit d'un programme de calcul des déplacements, contraintes et potentiels hydrauliques avec couplage élastoplasticité pour les problèmes de déformation plane ou à symétrie de révolution en milieu homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope. ROSALIE - Groupe 9 permet de modéliser le comportement d'un massif de sols fins saturés par un fluide interstitiel compressible ou incompressible. Le calcul fournit les déplacements, les charges hydrauliques et les contraintes au cours du temps.

Cette modélisation conduit à la résolution du système suivant (4) :

$$\begin{cases} [R] \{U\} - [C] \{H\} - \{F\} = \{0\} \\ - [C]^T \{U\} - [K] \{H\} + \{Q\} = \{0\} \end{cases}$$

avec : $\{U\}$: déplacements des noeuds,

$\{H\}$: charges hydrauliques aux noeuds,

$[R]$: matrice de rigidité du squelette du sol,

$[K]$: matrice de perméabilité du massif,

$[C]$: matrice d'interaction,

- {F} : forces nodales,
- {Q} : débits nodaux imposés.

Ce programme permet d'utiliser différents types de lois de comportement du squelette du sol :

- élasticité linéaire isotrope ou anisotrope
- élastoplasticité (élasticité linéaire - plasticité parfaite)
- élastoplasticité avec écrouissage (élasticité linéaire - plasticité avec écrouissage)

Le liquide interstitiel s'écoule dans le massif suivant la loi de Darcy avec un tenseur de perméabilité isotrope ou anisotrope. Il est également à noter que les différents paramètres de calcul peuvent être modifiés au cours du temps.

Schématisation du géotextile

Les géotextiles sont utilisés sous forme de nappes minces placées dans les massifs de sols construits (ouvrages de soutènement en terre, remblais, etc...). Ils peuvent donc être modélisés dans les problèmes plans à l'aide d'éléments unidimensionnels, possédant des caractéristiques mécaniques et hydrauliques suivant leur axe. Dans le rôle de renforcement mécanique d'un massif de sol, ils se comportent comme des armatures élastiques linéaires. Dans le rôle d'accélérateur de consolidation, ils favorisent l'écoulement de l'eau interstitielle grâce à leurs propriétés de drainage suivant leur axe.

La schématisation du géotextile s'effectue à l'aide d'un élément particulier ajouté à ROSALIE - Groupe 9 dont la description est donnée figure 1.



Figure 1 - Elément à 3 noeuds schématisant le géotextile

L'élément est unidimensionnel à 3 noeuds et utilise les paramètres suivants :

- E module d'Young ↘ coefficient de Poisson
- K_t perméabilité dans le plan du géotextile b épaisseur du géotextile

La raideur J du géotextile est déterminée par E et ν , sa transmissivité θ par K_t et b. La modélisation d'une nappe de géotextile se fait en la considérant comme une succession de ces éléments. L'ensemble des nappes se superpose au maillage représentant le massif de sol.

Hypothèses

Pour cette première étude, on s'est placé dans le cadre suivant :

- Le problème traité utilise le couplage élasticité-diffusion en déformation plane ;
- La loi de comportement du squelette du sol est élastique linéaire isotrope ;
- Le liquide interstitiel est considéré comme incompressible ;
- Les caractéristiques du sol et du géotextile ne se modifient pas au cours du temps ;
- La liaison sol-géotextile est supposée parfaite.

Cette étude s'applique particulièrement aux nappes de géotextiles à forte transmissivité, et nous permet de préciser leur apport dans la consolidation des sols fins.

EXEMPLE TRAITÉ

Caractéristiques et maillage

Ce modèle représente un remblai de sol fin symétrique, à parements verticaux, comportant des nappes de géotextiles régulièrement espacées. Les dimensions sont de 6,40m de hauteur pour une largeur de 20 m. Ce remblai correspond à un ouvrage expérimental construit au C.E.T.E. de ROUEN.

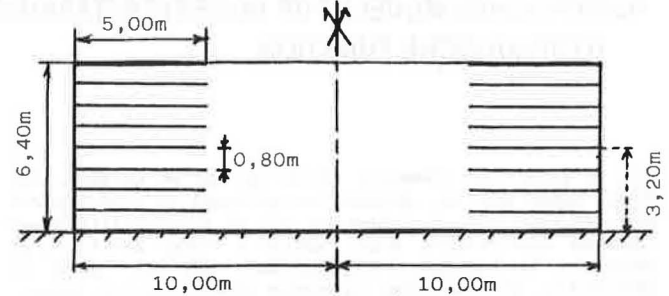


Figure 2 - Schéma du remblai

On se propose d'étudier l'évolution de la consolidation du massif aux environs de la cote + 1,6 m. Pour ce calcul, nous ne considérerons que les 4 premières couches de sol, soit 3,20 m, la partie supérieure du remblai intervenant sous forme de chargement.

La symétrie du remblai permet de limiter le maillage à un demi-profil. Les nappes de géotextiles ont 5 m de largeur et sont espacées de 0,80 m.

Le modèle retenu a les caractéristiques suivantes :

- 16 éléments rectangulaires à 8 noeuds
- 12 éléments unidimensionnels à 3 noeuds.

Le maillage comporte 65 noeuds.

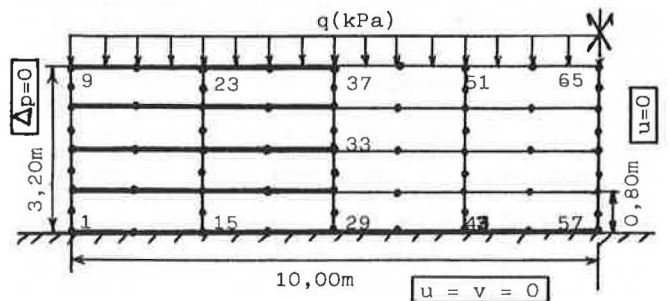


Figure 3 - Description du maillage

Conditions aux limites

- Les déplacements sont nuls au niveau inférieur du massif.
- Les déplacements horizontaux sont nuls sur l'axe de symétrie.
- Les surpressions interstitielles sont nulles sur le parement, ce qui autorise l'écoulement de l'eau.

Discrétisation du temps

Le temps est discrétisé en 2 ou 3 zones de pas de temps égaux suivant les calculs effectués (voir figure 4).

La zone 1 correspond à la période de construction, soit

24 jours. Les zones 2 et 3 sont les périodes de consolidation.

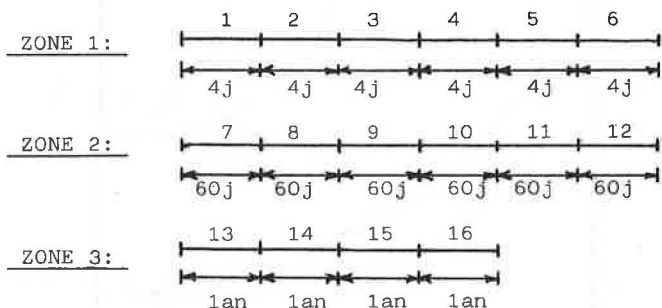


Figure 4 - Discretisation du temps

Chargement

Le chargement s'applique de deux façons successives :

- augmentation du poids volumique des éléments au cours du temps ;
- charge répartie sur le sommet du maillage, représentant les couches de sol supérieures.

La période de construction, et donc de chargement, dure 24 jours. Ensuite, la charge reste constante.

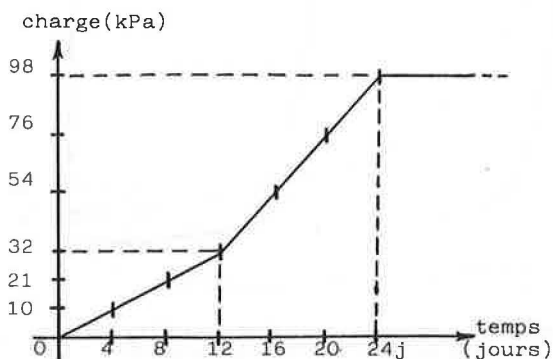


Figure 5 - Diagramme de chargement au niveau du profil étudié

Caractéristiques des matériaux

Le sol est un limon homogène, d'un poids volumique de 20,4 kN/m³. Dans les calculs, nous utiliserons deux sols et trois géotextiles (seule la perméabilité dans le plan est variable). Les caractéristiques mécaniques du géotextile sont celles que l'on rencontre fréquemment dans le renforcement des sols :

- raideur : J = 972 kN/m
- transmissivité ($K_t \times b$) = $1,1 \times 10^{-5}$ m²/s pour le géotextile très perméable.
- transmissivité ($K_t \times b$) = $1,1 \times 10^{-8}$ m²/s pour le géotextile peu perméable.

Tableau des caractéristiques mécaniques des matériaux

n° calcul	Perméabilité sol	Perméabilité textile	Paramètres sol-textile
1	$K_S=10^{-8}$ m/s	$K_t = 0$ *	$E_{sol} = 2$ MPa $\nu_{sol} = 0,35$ $J = 972$ kN/m** $b = 0,0027$ m
2		$K_t=4.10^{-6}$ m/s	
3		$K_t=4.10^{-3}$ m/s	
4	$K_S=10^{-9}$ m/s	$K_t = 0$ *	$E_{sol} = 2$ MPa $\nu_{sol} = 0,35$ $J = 972$ kN/m** $b = 0,0027$ m
5		$K_t=4.10^{-6}$ m/s	
6		$K_t=4.10^{-3}$ m/s	

* $K_t = 0$ correspond à une perméabilité nulle dans le plan du géotextile. Ce cas permet de supprimer l'action hydraulique du géotextile tout en maintenant son action mécanique.

** J représente la raideur initiale du géotextile.

LES RESULTATS

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux résultats des points placés sur le profil horizontal à la cote + 1,60 m.

Les déplacements horizontaux et verticaux, les potentiels hydrauliques et les contraintes, sont affichés pour les points choisis à chaque pas de temps.

Le dépouillement est effectué sous formes de courbes :

- tassement en fonction de la distance par rapport au parement, sur le profil horizontal retenu,
- surpressions interstitielles en fonction de la distance, sur ce même profil,
- tassement du noeud 33 (extrémité de la nappe) en fonction du temps.

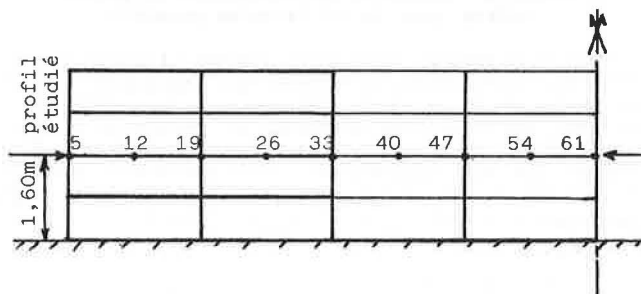


Figure 6 - Profil horizontal et noeuds choisis pour les résultats

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le rôle des nappes de géotextiles incluses dans un ouvrage en terre.

Tassement à une époque donnée

Les tassements sont étudiés pour une valeur du temps égale à 204 jours, ce qui correspond à un temps d'attente moyen sur un chantier réel.

Les figures 7 et 8 sont obtenues pour les deux perméabilités du sol et les trois perméabilités du textile.

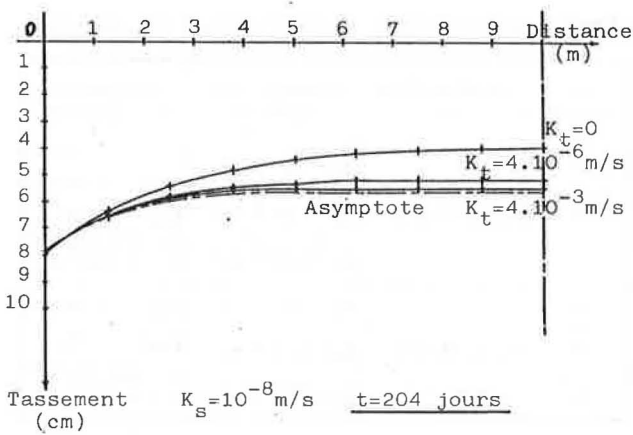


Figure 7 - Evolution des tassements, du profil retenu, pour le sol le plus perméable

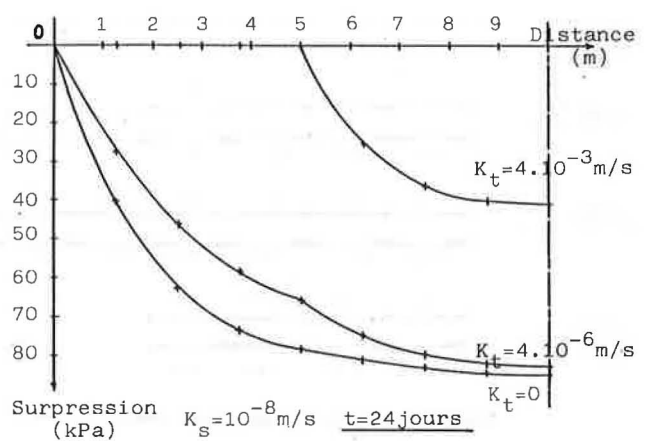


Figure 9 - Surpressions interstitielles sur une nappe pour le sol le plus perméable

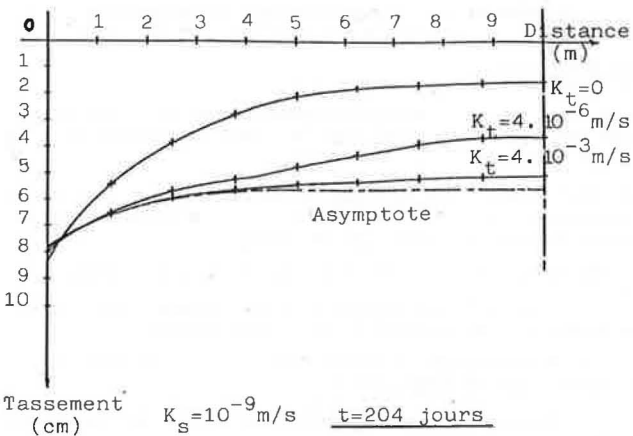


Figure 8 - Evolution des tassements, du profil retenu, pour le sol le moins perméable

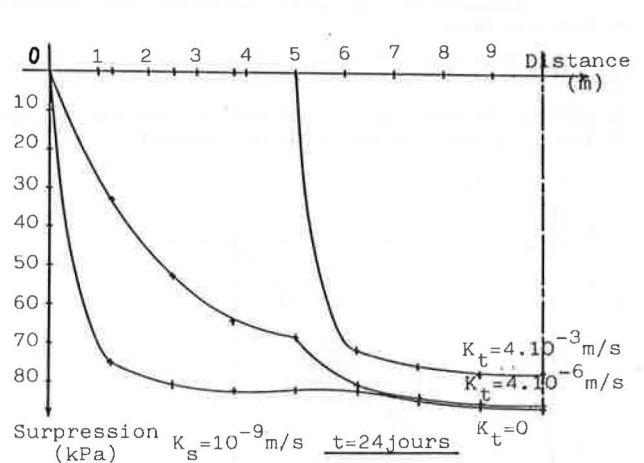


Figure 10 - Surpressions interstitielles sur une nappe pour le sol le moins perméable

Sur les deux figures, nous avons indiqué la courbe asymptote des déplacements verticaux, qui représente la fin de la consolidation. A $t = 204$ jours, le tassement obtenu sans les propriétés drainante du géotextile correspond à $K_t = 0$; on constate alors que les deux sols considérés ont des comportements assez différents, puisque si on compare les déplacements, sur l'axe, de cette date, par rapport au déplacement final, on obtient :

- * 70 % pour $K_s = 10^{-8}$ m/s
- * 30 % pour $K_s = 10^{-9}$ m/s

La prise en compte des propriétés drainantes des géotextiles accélère nettement la consolidation, surtout si K_s est petit et K_t grand.

Certaines courbes de tassements sont irrégulières. Ceci est dû à la présence de nappes de géotextile qui ne sont disposées que sur une largeur de 5 m. Le tassement du massif ne s'effectue donc pas de façon homogène ; il est plus rapide dans la zone d'influence de ces nappes.

Dissipation des surpressions

Les surpressions interstitielles sont étudiées à 24j., c'est-à-dire à la fin de la période de construction du remblai. Les figures 9 et 10 sont tracées en fonction des différentes perméabilités du sol et du géotextile.

La fin de la construction d'un ouvrage en terre saturée d'eau est une période critique, car des ruptures peuvent se produire au moment où les surpressions interstitielles sont les plus fortes. Les surpressions, qui sont maximales à cette époque, réduisent les forces de frottement mobilisées le long de la surface de rupture. Il est donc intéressant d'avoir une diminution rapide de la pression interstitielle pour pouvoir assurer la stabilité de l'ouvrage.

La perméabilité du sol influence la répartition de la surpression le long du profil étudié (courbes $K_t = 0$). La différence se remarque surtout dans les cinq premiers mètres, ce qui montre que le risque de rupture augmente lorsque la perméabilité du sol diminue. Les valeurs maximales obtenues sur l'axe du remblai sont voisines dans les deux cas, car la consolidation a à peine commencé à $t = 24$ jours lorsque $K_t = 0$, ces valeurs correspondent approximativement à charge verticale sur le profil étudié.

La réduction de la surpression est considérable lorsque des géotextiles sont utilisés. Dans le cas du géotextile le plus perméable ($K_t = 4.10^{-3}$ m/s), il n'y a pas de surpression de l'eau à la fin du chargement dans les cinq premiers mètres pour les deux sols retenus. La consolidation est en outre déjà très avancée dans les 5 mètres

suivant (figure 9) pour le sol de perméabilité $K_s=10^{-8}m/s$. Lorsque $K_t = 4.10^{-6} m/s$ (valeur approximative pour un géotextile tissé), on constate que le drainage est beaucoup moins efficace. Il y a des surpressions dans le géotextile et sur l'axe le gain est très faible.

Il semble donc qu'il existe une valeur optimale des caractéristiques du géotextile, en fonction de la perméabilité du sol. On peut admettre que cet optimum correspond à la plus faible transmissivité du géotextile pour laquelle il n'y aurait pas de surpression interstitielle à la fin de la construction près du parement de l'ouvrage. Ce drainage doit tenir compte du déroulement de la construction de l'ouvrage (sa géométrie et l'espacement des nappes), et des critères habituellement utilisés pour les géotextiles (transmissivité = $K_t \times b$).

Evolution du tassement en fonction du temps

Pour étudier l'évolution du tassement, nous nous sommes placés au point 33, extrémité de la nappe de géotextile à l'intérieur du massif.

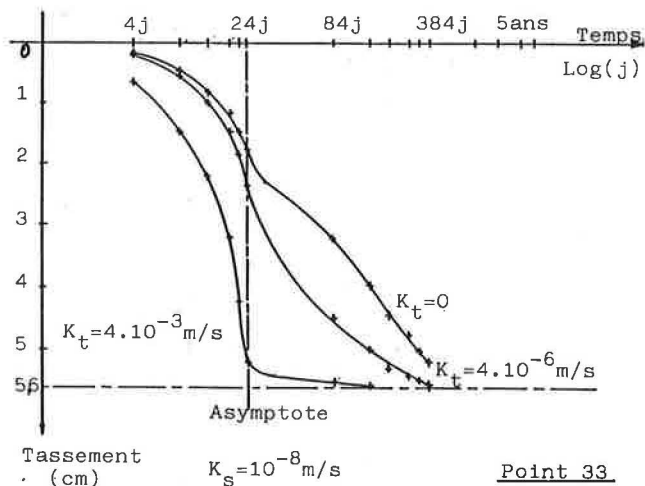


Figure 11 - Evolution du tassement de l'extrémité interne de la nappe, pour le sol le plus perméable

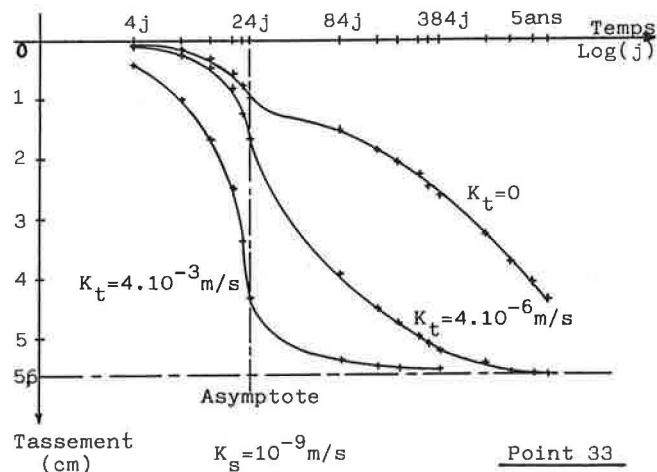


Figure 12 - Evolution du tassement de l'extrémité interne de la nappe, pour le sol le moins perméable

Sur les figures 11 et 12, nous avons également indiqué le déplacement vertical limite au point considéré, soit 5,6 cm. Ceci permet d'estimer le pourcentage de tassement obtenu à un temps donné.

Considérons la valeur caractéristique de 80 %. Si on ne tient pas compte des propriétés drainantes du géotextile ($K_t = 0$), pour atteindre cette valeur, il faut environ 220 jours avec $K_s = 10^{-8} m/s$ et plus de cinq ans avec $K_s = 10^{-9} m/s$.

La prise en compte de ces propriétés drainantes des géotextiles raccourcit considérablement ces durées. Pour $K_t = 4.10^{-6} m/s$, il faut respectivement 90 jours et 150 jours, tandis que pour $K_t = 4.10^{-3} m/s$, la valeur caractéristique de 80 % est pratiquement atteinte dès la fin de la construction (à 24 jours) dans les deux cas.

Là aussi, on constate qu'il doit exister un dimensionnement optimal des nappes de géotextiles, de telle sorte qu'un certain pourcentage du tassement final (80 % par exemple) soit atteint à une date fixée à l'avance dans certaines zones du massif sensible à la rupture. Un tel dimensionnement peut être très utile pour l'accélération du tassement d'un remblai hydraulique, par exemple, destiné à supporter à des charges.

Déformations et efforts dans le géotextile

Pour le massif étudié, on constate que les déformations maximales sont obtenues près du parement, et varient peu au cours de la consolidation. Ces déformations sont de l'ordre de 1,5 %, ce qui correspond à une tension maximale de la nappe de 14,6 kN/m.

Cette valeur de tension est tout à fait acceptable pour un géotextile utilisé en renforcement, car elle supprime pratiquement tout risque de fluage du matériau.

CONCLUSION

Dans le programme de calcul aux éléments finis ROSALIE-Groupe 9 prenant en compte la consolidation d'un sol biphasique, nous avons ajouté des éléments plans, résistants et drainants, schématisant des nappes de géotextile. Cet outil permet de mettre en évidence et de quantifier deux phénomènes : 1. - la dissipation grâce aux géotextiles, des surpressions interstitielles qui ont tendance à naître pendant la construction d'un remblai en sols fins humides, 2. - l'accélération de consolidation apportée par les géotextiles drainants au sein d'un massif de sol. Ainsi, pour une géométrie de renforcement donnée et un sol fin de perméabilité donnée, on détermine la transmissivité minimale des géotextiles qui évite la naissance des surpressions interstitielles pendant la construction de l'ouvrage.

L'emploi des sols fins de qualité médiocre constitue probablement un avenir prometteur pour le renforcement des sols par géotextile ; les calculs présentés permettent un meilleur dimensionnement de ces ouvrages.

REFERENCES

- (1) Belkeziz A., Magnan J.P., "Analyse numérique de la consolidation bidimensionnelle des sols élastoplastiques" Rapport de Recherche LPC n° 115 (1982)
- (2) Mouratidis A., Magnan J.P., "Modèle élastoplastique anisotrope avec écrouissage pour le calcul des ouvrages sur sols compressibles" Rapport de Recherche LPC n° 121 (1983).
- (3) Magnan J.P., "Modélisation numérique du comportement des argiles molles naturelles" Thèse, Paris VI (1984)
- (4) Zienkiewicz O.C., "La méthode des éléments finis" Ediscience (1979)