

BELLONI L. et SEMBENELLI P.
ELC-Electroconsult, Italie

Remblais routiers sur terrains compressibles exécutés à l'aide de textiles synthétiques Road embankments on compressible soils constructed with the aid of synthetic fabrics

SUMMARY

An international highway in Africa had to cross several km of deep and young peat deposits. Penetration tests and laboratory tests on large undisturbed samples, showed that the peat was extremely soft. It was decided to build a test embankment to explore the possibility of improving the embankment's stability and performance placing a synthetic cloth over the peat. An embankment 250 m long was built and instrumented with piezometers and settlement plates. A load up to 3.6 t/m^2 was applied on the peat in 32 days. Pore pressures were observed for 2 750 hours and settlements recorded for almost 2 years. Penetration tests were repeated after embankment construction. Embankment performance compared with that of similar embankments placed on fascines or directly on the peat, showed that the synthetic cloth works applying a horizontal constraint to the peat surface, thus avoiding failure and reducing lateral spread, pore pressure build up, long term settlements.

LE PROBLEME ET LES CONDITIONS LOCALES

Au cours de la construction d'une route internationale, dans la zone des grands lacs Africains, on a dû affronter à plusieurs reprises le problème de réaliser des remblais de grande longueur sur des fonds de vallée tourbeuse. Il s'agissait toujours de tourbes tropicales à papyrus de formation récente, très compressibles, dont l'épaisseur et l'étendue faisaient écarter toute possibilité de remplacement. Surtout dans la partie centrale du parcours il fallait franchir 7 marais où l'épaisseur de la tourbe était entre 15 et 30 m et dont la longueur totale dépassait les 5 km. La seule exploration profonde possible dans les tourbes était les essais pénétrométriques. On a exécuté des essais Standard aussi bien que des essais miniature Künzle (1). Les essais pénétrométriques ont permis de vérifier sur tous les marais la consistance de la tourbe. L'observation montre l'existence d'une mince croûte plus résistante en surface. Jusqu'à une profondeur de 8 m environ, la tourbe n'offre aucune résistance à la pénétration, même pas à la pénétration miniature. Plus

en profondeur la tourbe contient un certain pourcentage de limon gris et montre compacité et résistance croissantes. Les caractéristiques de la tourbe dans son état naturel sont réunies dans le Tableau 1.

Tableau 1

CARACTERISTIQUES DES TOURBES AVANT LA CONSTRUCTION DU REMBLAI

Indice des vides (*)	$e = 5.7$	(-)
Poids de volume sec (*)	$\gamma_s = 0.2 + 0.3$	(t/m ³)
Matière organique (*)	≈ 50	(%)
Teneur en eau (*)	$w = 300 \pm 400$	(%)
Fraction passant la maille n. 200 (*)	≈ 30	(%)
Limite de liquidité (*)	$LL = \sim 200$	(-)
Coefficient de perméabilité (1)	$K = 10^{-3} \cdot 10^{-4}$	(cm/s)
Coefficient de consolidation (1)	$c_v = 5 \times 10^{-1}$	(cm ² /s)
Résistance pénétrométrique standard SPT (2)	$N = 0.33 (Z-8)$	(coups/30 cm)
Résistance pénétrométrique miniature (couche superficielle) (2)	$N' = 0.25 (Z)$	(coups/10 cm)
Résistance pénétrométrique miniature (couche profonde) (2)	$N' = 5 + 2.10 (Z-8)$	
Résistance au cisaillement	$= 0.7$	(t/m ²)

(1) pour pressions verticales efficaces entre 0,2 et 0,4 kg/cm²
(2) Z est la profondeur à partir du niveau du terrain, calculée en m
(*) couches superficielles non chargées

NOTE (1) : Le pénétromètre Künzle a une pointe conique de 26 mm et angle de 30°, qu'on enfonce avec un marteau de 10 kg tombant de 50 cm de hauteur en mesurant le nombre des coups nécessaires pour enfoncer les tiges de 10 cm.

D'une façon générale, on peut distinguer deux couches dans la tourbe: une couche superficielle, composée presque entièrement de papyrus en décomposition et une couche profonde, où la décomposition est presque complète et le pourcentage de fins élevé. Les tourbes n'ont jamais été surchargées. A quelques endroits elles ont été partiellement drainées pour y implanter des buissons de thé. La nappe phréatique se trouve à quelques centimètres de la surface et la tourbe reste submergée en permanence et est complètement saturée. On n'a pu obtenir des échantillons intacts de grandes dimensions que de la couche superficielle qui est d'ailleurs celle qui a une importance prépondérante en ce qui concerne la stabilité et le tassement du remblai. Sur ces échantillons on a mesuré la compressibilité et la perméabilité à l'aide d'une série d'essais oedométriques de 200 mm de diamètre et 200 mm de hauteur. La résistance au cisaillement, au contraire, a été obtenue de l'analyse de la rupture d'un remblai en construction. Les faibles caractéristiques mécaniques des tourbes et l'envergure des remblais, qu'il fallait d'ailleurs appuyer sur ces matériaux, imposaient d'étudier de plus près le problème de l'appui du remblai sur la tourbe avec un remblai expérimental. La décision d'explorer les possibilités d'améliorer la stabilité et le com-

portement du remblai avec l'emploi des feutres synthétiques fut ainsi prise. C'était le 1972.

LE REMBLAI EXPERIMENTAL

La section du remblai, qui montre la Figure 1, a été étudiée dans le but de maintenir les contraintes au cisaillement dans la fondation au-dessous de la valeur de la résistance au cisaillement non drainée et de réduire à moins de 0.05 kg/cm^2 les contraintes des engins de chantier sur la surface de la tourbe. Le remblai avait une longueur de 100 m et devait être réalisé en 5 étapes. La vitesse de construction devait être définie pendant les travaux sur la base des mesures de pression interstitielle. Pour contrôler le comportement du remblai on prévut deux sections de mesure espacées de 40 m. Chaque section était équipée avec 4 piézomètres et 6 plaques de tassement placées au-dessous et à côté du remblai. Les piézomètres étaient formés par des simples tuyaux de 25 mm de diamètre percés sur une longueur de 500 mm. Les plaques de tassement étaient des dallettes en béton de 0.5 m de côté, munies d'un rond d'acier de 10 mm protégé par une gaine assurant le libre mouvement de la tige de mesure. On décida de compléter l'expérience en réalisant sur le

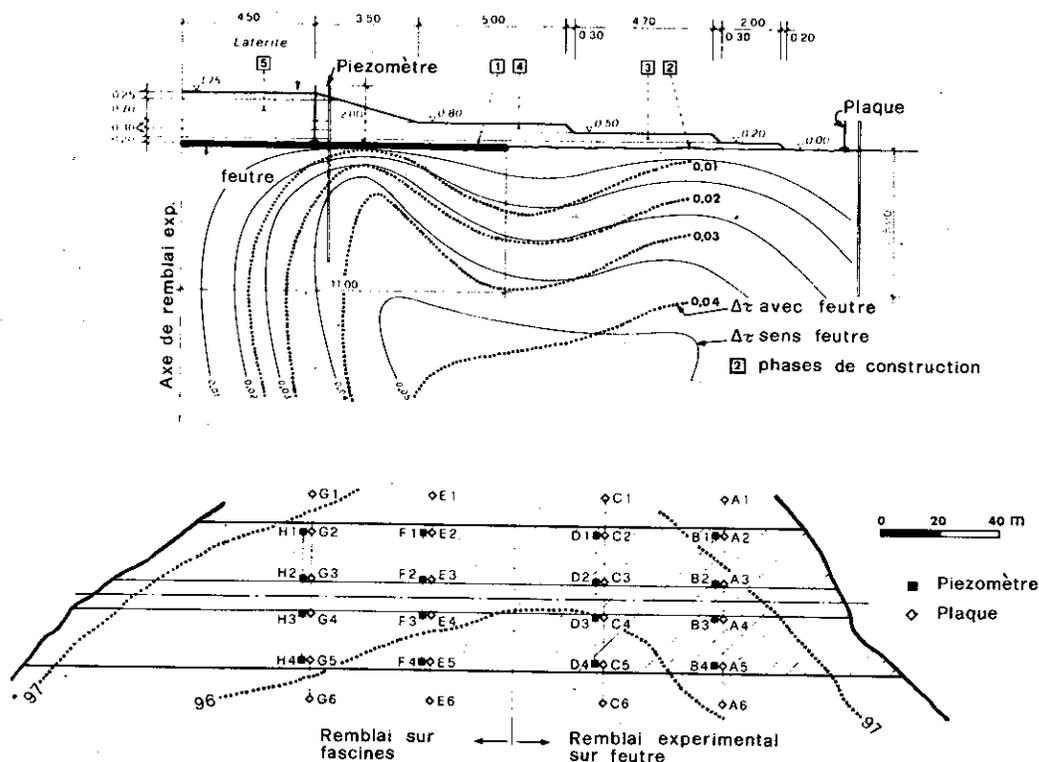


Figure 1 - Coupe et plan du remblai expérimental avec position des piézomètres et des plaques de tassement et ligne d'égal niveau des contraintes de cisaillement dans le sol sans feutre et avec le feutre

même axe et de suite au remblai, un remblai similaire posé sur des fascines en bois. L'ensemble atteignait ainsi une longueur totale de plus de 250 m et franchissait une vallée de côté à côté. La fondation du remblai expérimental était formée par 15 m de tourbe recouvrant un fond rocheux franc. Dans la tourbe on pouvait distinguer les deux couches illustrées auparavant, la première ayant une épaisseur de 7 m et la plus profonde de 8 m. Le remblai fut posé sur le terrain simplement débroussaillé pour faciliter la mise en place du feutre. Le terrain ne fut pas nivelé pour ne pas endommager la croûte superficielle. La fondation du remblai avait donc une cote variable, légèrement en soucoupe. Comme feutre on a choisi le BIDIM-U-44 de Rhône-Poulenc dont les caractéristiques principales sont réunies dans le Tableau 2. Ce feutre est un non-tissé aux caractéristiques isotropes en fibres polyester assurant une haute résistance, un allongement réduit, une bonne résistance à l'abrasion, une modeste absorption d'eau et une bonne résistance aux acides organiques. Le feutre fut mis en place sur une seule épaisseur en déroulant sur le terrain des bandes de 5.20 m de largeur cousues entre elles. En suite, on plaça les plaques de tassement et les piézomètres. La construction du rem-

blai commença 3 jours après la fin des travaux préliminaires suivant les phases de chargement montrées dans la Figure 1. Après 16 jours de travail, les pressions interstitielles mesurées dans les piézomètres, que la Figure 2 montre, furent jugées excessives. On décida, par conséquent, de suspendre la mise en place, qu'on reprit 10 jours après avec la phase 5. Le remblai fut ter-

Tableau 2
CARACTERISTIQUES DU FEUTRE SYNTHETIQUE EMPLOYE SOUS LE REMBLAI

Poids	330	(g/m ²)	
Epaisseur	2,4	(mm)	
Résistance à la traction	19	(kg/cm)	
Allongement à rupture	60	(%)	
Anisotropie de résistance	25	(%)	
Absorption d'eau	0,4	(%)	
Indices des vides	e = 4	(-)	(1)
Coefficient de perméabilité	K = 7 x 10 ⁻²	(cm/s)	(1)
Porosité	n = 90	(%)	

(1) soumis à une charge de 20 (t/m²)

miné en 6 jours, soit 32 jours après le commencement des travaux. Les épaisseurs prévues par le projet ont toujours été respectées, même quand les tassements causaient des dépressions sur la surface du remblai.

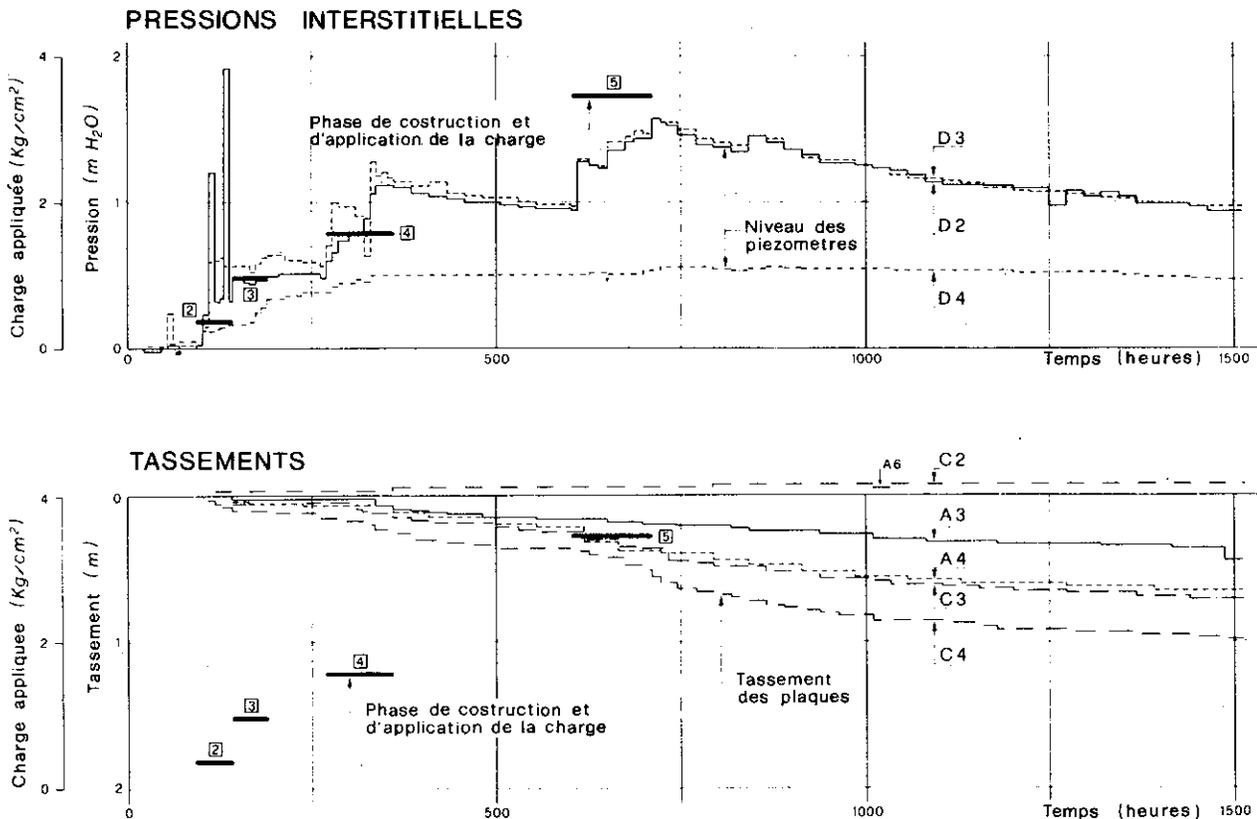


Figure 2 - Evolution des pressions interstitielles dans la tourbe et des tassements du plan d'appui du remblai expérimental avec le temps

Seulement la couche finale de 0.25 m de latérite fut augmentée à certains endroits pour donner au remblai terminé un profil régulier. Le remblai terminé applique une charge de 3.6 t/m^2 . Les matériaux pour le remblai furent obtenus de petites carrières aux alentours. Pour la première couche (phase 2) on employa du sable A3, pour les couches successives du sable limoneux A-2-4 de granulométrie assortie, densité sèche optimum 2.1 t/m^3 , teneur en eau optimum 7.5%. Pour la couche superficielle on employa de la latérite. Le répandage des matériaux fut fait au bulldozer FIAT AD7 et le compactage de la couche de latérite avec un rouleau à pneus Hyster, tracté par le bulldozer. Les charges concentrées des engins de chantier ont entraîné des pointes de pression interstitielle très élevées, qui dissipaient d'ailleurs très rapidement. Sur la base des données des tassements on a calculé la valeur du coefficient de consolidation c_v . Dans un délai de 100 jours du début de la construction du remblai, le 85% du tassement s'était produit, ce qui permit de calculer le coefficient de consolidation moyen pour toute la tourbe qui résultait $c_v = 3 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$. Un an après l'achèvement du remblai on a répété les essais pénétrométriques miniature. Les résultats de la Figure 3 montrent une augmentation de la résistance à la pénétration de plus du 300% dans la couche superficielle et du 50% dans la couche profonde. L'augmentation de résistance est proportionnelle à la charge appliquée à la tourbe et les caractéristiques de

la tourbe après la construction du remblai expérimental sont réunies dans le Tableau 3.

Tableau 3
CARACTERISTIQUES DES TOURBES APRES LA CONSTRUCTION DU REMBLAI

Teneur en eau naturelle	$w = 180$	(%)
Coefficient de consolidation	$c_v = 3.54 \times 10^{-1}$	(cm^2/s)
Résistance pénétrométrique miniature (couche superficielle)	$N^1 = 0.95$	(Z) (coups/10 cm)
Résistance pénétrométrique miniature (couche profonde)	$N^1 = 7 + 2.25$	(Z-8)
Coefficient de consolidation secondaire (couche superficielle)	$c_s = 0.01$	
Coefficient de consolidation secondaire (couche profonde)	$c_s = 0.02$	
Rapport de compressibilité (couche superficielle)	$C_{r1} = 0.22$	
Rapport de compressibilité (couche profonde)	$C_{r2} = 0.16$	

- Toutes les valeurs se réfèrent aux tourbes chargées avec un remblai de 1.75 m d'épaisseur

2750 heures après le début des opérations de charge, la fondation du remblai avait tassé moyennement 0.60 m . Le tassement maximum était de 1.40 m . Au bord du remblai, la tourbe subit un gonflement de 0.15 m . Sous l'effet de la surcharge due au remblai, qui atteint la valeur finale de 3.6 t/m^2 des pressions interstitielles se déclanchent, l'augmentation de pression interstitielle sur l'axe du remblai est d'abord proche au 100% de la charge appliquée mais diminue au 30% de la charge pour les dernières couches mises en place. Les pressions interstitielles se réduisent, grâce au drainage vers les flancs du remblai, d'abord assez rapidement, puis plus lentement. 2000 heures après, le début des opérations de charge, une pression interstitielle de l'ordre du 20% de la surcharge appliquée existe encore sous la partie centrale du remblai.

INTERPRETATION DES RESULTATS

Les mesures exécutées lors de la construction du remblai et poursuivies pendant presque deux ans, permettent d'essayer une interprétation du comportement du remblai. Une interprétation devient autant plus intéressante du fait que l'on possède, à côté des mesures faites sur le remblai expérimental, les données d'un remblai placé sur fascines et d'un remblai placé directement sur la tourbe. Le remblai expérimental représente un cas d'interaction sol-structure compliqué et jusqu'au présent peu étudié. Avant tout il faut examiner l'état des contraintes et des déformations au-dessous du remblai. La charge appliquée par le remblai produit sur la surface du sol des contraintes de traction sous la partie centrale du remblai et des contraintes de compression près des bords. Il en découle des déformations d'allongement sous le remblai et

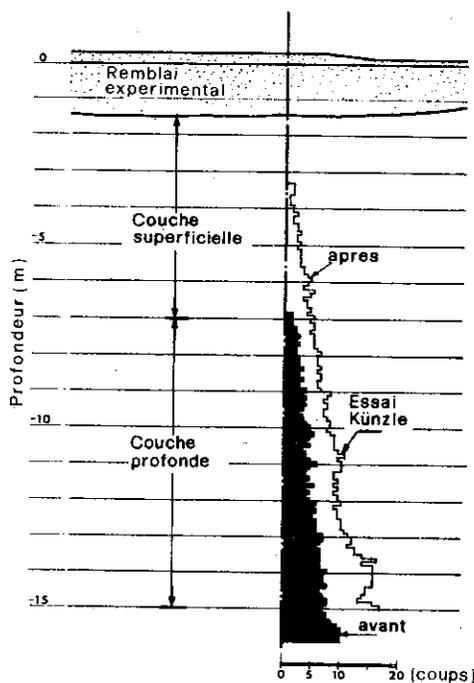


Figure 3 - Résistance à la pénétration dynamique de la tourbe après et avant la construction du remblai expérimental

des contraintes plus loin. Ces déformations entraînent le feutre et y produisent un état de contrainte qui, en vue de la position et longueur du feutre, correspond à une traction généralisée. Le feutre donc, appliqué sur la surface du sol des forces tangentielles vers l'axe du remblai de grandeur variable en fonction de la déformation du feutre. Cette déformation est différente de point à point et s'accroît avec les tassements, c'est-à-dire avec la construction du remblai et la consolidation de la tourbe. L'effet d'une charge tangentielle uniforme de 2 t/m^2 (soit près d'un dixième de la charge de rupture du feutre) a été calculé avec les formules de Cerruti. Plus en détail, les contraintes horizontales σ_x sont de compression sur, à peu près, le 75% de la largeur du remblai et pour le reste elles sont des tractions. Les contraintes verticales σ_z sont en général de traction sauf dans une étroite zone triangulaire au centre du remblai, les contraintes de cisaillement sont toujours de signe contraire à celles produites par une charge verticale. La superposition du champ de contraintes appliquées par le feutre et du champ de contraintes appliquées par la charge trapèze du remblai, produit une diminution des contraintes de cisaillement donc un accroissement du Facteur de Sécurité. La Figure 1, qui montre les lignes d'égal niveau de contrainte de cisaillement dans la tourbe sans et avec le feutre, permet d'apprécier l'effet de celui-ci. Pour ce qui concerne les pressions interstitielles, la Figure 4 montre les valeurs mesurées en fonction de la charge verticale appliquée, soit le rapport $\Delta u / \Delta \sigma_v = B (\Delta \sigma_3 / \Delta \sigma_1) + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) / \Delta \sigma_1$

La présence du feutre fait augmenter le terme hydrostatique $\Delta \sigma_3 / \Delta \sigma_1$ et réduit le terme déviatorique $(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) / \Delta \sigma_1$. Il ne faut pas oublier que la construction du remblai déclenche la consolidation de la tourbe, ce qui produit une diminution de volume et donc une variation du paramètre A et une diminution progressive du niveau des contraintes de cisaillement et donc un effet de surconsolidation qui se manifeste lors de l'application des tranches de charge successives. Pour de petites valeurs de la charge appliquée les déformations du feutre, et donc les contraintes qu'il est capable d'appliquer, sont petites et les pressions interstitielles s'accroissent plus que dans le remblai sur fascines qui s'avantage d'une certaine rigidité à flexion des fascines. En augmentant la charge, l'effet du feutre devient perceptible et les pressions interstitielles se réduisent plus vite dans le remblai sur feutre que dans le remblai sur fascines comme montre la Figure 4. Pour ce qui concerne l'ampleur

des tassements à court terme on a remarqué que les tassements différentiels du remblai sur feutre sont plus grands que les tassements différentiels du remblai sur fascines.

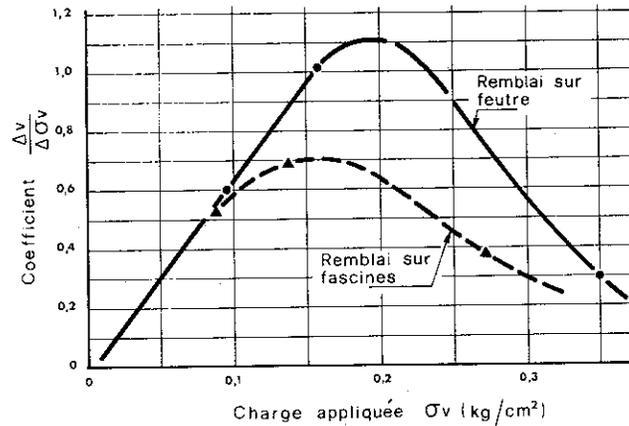


Figure 4 - Coefficient de pression interstitielle en fonction de la charge appliquée

Le rapport entre tassement maximum et tassement moyen, sur une même section en travers, est $H_{\max} / H_m = 2.3$ pour le remblai expérimental tandis que sur fascines $H_{\max} / H_m = 1.9$. Cette différence est due à la totale flexibilité du feutre qui ne répartit pas horizontalement les charges et n'amortit pas les déformations locales tandis que les fascines ont toujours une certaine rigidité et capacité de repartition. Le tassement à court terme observé sous le remblai expérimental, que la Figure 5 montre rapporté à la charge unitaire, se situe dans l'ordre du 29%/cycle logarithmique tandis que le tassement mesuré au laboratoire pendant des essais oedométriques de large diamètre est de l'ordre du 10%/cycle logarithmique. Cette différence

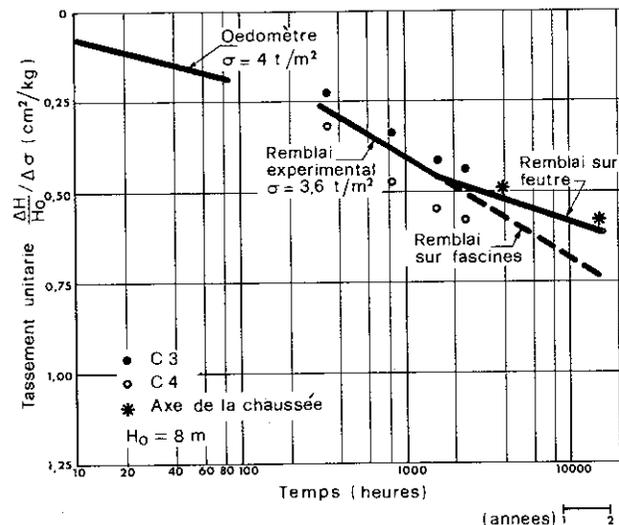


Figure 5 - Tassement du plan d'appui du remblai en fonction du temps

est due aux déformations latérales qui portent le feutre à travailler. A long terme, après environ 2000 heures du chargement, les tassements se réduisent appréciablement et leur vitesse passe à environ le 15%/cycle logarithmique, presque égale à la vitesse mesurée dans l'oedomètre. Ceci n'arrive pas dans le remblai sur fascines qui continue à tasser à la même vitesse. C'est justement le résultat des contraintes horizontales appliquées par le feutre que les déformations initiales aident à mobiliser. Les tassements sont donc sensiblement réduits grâce à la faible déformabilité à traction, à la résistance et à la capacité du feutre de se raccrocher au sol et au remblai. Du côté stabilité, on note que aucune rupture ne se produit en dessus du remblai expérimental tandis qu'un remblai posé directement sur la tourbe s'effondra avec une rupture circulaire, sous une épaisseur de remblai qui était seulement le 80% de l'épaisseur du remblai expérimental. Etant donné que la résistance au cisaillement non drainée peut être considérée comme proportionnelle à la résistance pénétrométrique ($c_u = CR_p$) on retrouve ici que le rapport c_u/P , qui est 0.3 environ dans la tourbe intacte, passe à 0.6 dans la première couche après application de la surcharge. Donc l'effet de la surcharge est positif et très grand mais pour l'atteindre il faut qu'on puisse éviter la rupture initiale.

L'APPLICATION DE L'ETUDE

La construction, les contrôles et l'analyse des données du remblai expérimental ont aidé à mieux comprendre le comportement du système remblai-feutre-sol et de s'assurer aussi de la praticité de mise en oeuvre et de l'efficacité du feutre comme seule mesure pour

bâtir sur les tourbes. L'emploi généralisé du feutre aurait permis une exécution sans problèmes des remblais routiers en assurant la stabilité de la route et en réduisant ses tassements à long terme. La seule précaution nécessaire, entièrement liée d'ailleurs à la nature de la tourbe et à ses caractéristiques de consolidation, était la vitesse maximum admissible de mise en place du remblai qui, dans le cas échéant, fut fixée en 20cm/4 jours. Sur ces bases on prit la décision d'utiliser le feutre pour tous les remblais sur tourbe de l'autoroute. La Figure 6 montre un de ces remblais en construction.

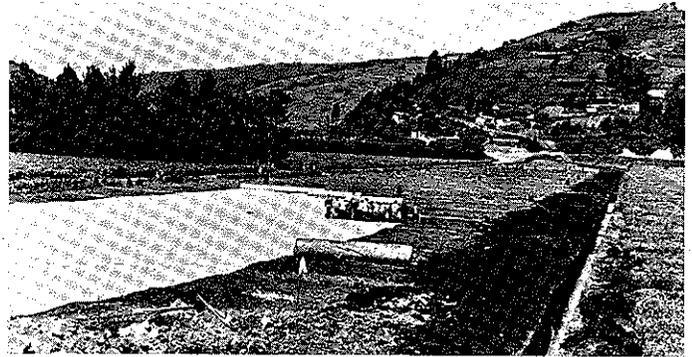


Figure 6 - Mise en place du feutre pour un remblai sur le tracé

BIBLIOGRAPHIE

- SEMBENELLI P. (1976) "Feltri anticontaminanti e fascine per appoggio di rilevati stradali", Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. X, No. 3