RIGO, J. M.
Université de Liège, Liege, Belgium
PERFETTI, J.
Rhône-Poulenc, France

Fatigue Study of Geotextiles

Etude en fatigue des géotextiles

S U M M A R Y

In some applications geotextiles are confronted with the problem of repeated loads.

Till now, calculators didn't dispose of datas concerning failure mecanism of that kind of material in such a way of stressing.

The purposes of this study are the determination of the endurance limite of "fatigue-traction" of geotextiles and the determination for loads level smaller than that limit by the use of rheological models.

R E S U M E

Certaines utilisations des géotextiles voient ceux-ci confrontés aux problèmes des charges répétées.

A ce jour, les auteurs de projets ne disposent pas de renseignements relatifs aux mécanismes de rupture de ces matériaux sous ce type de sollicitation.

L'étude proposée a pour objet la détermination de la limite d'endurance en "fatigue-traction" des géotextiles et la prédétermination des déformations pour des niveaux de charges inférieurs à cette limite. Pour cela un modèle rhéologique a été établi.

1- INTRODUCTION

Cette étude est le résultat d'une campagne menée tant sur le plan expérimental que théorique avec des géotextiles sollicités en "fatigue-traction" sous charges répétées.

L'observation du comportement sans charges statiques et dynamiques nous permet d'établir des modèles mathématiques sur la rhéologie de ces matériaux.

2- ESSAIS

2.1. Méthodologie

L'étude expérimentale consiste en la sollicitation en traction, à une fréquence de 0,6 Hertz (passage d'un camion à 10 km/h), d'éprouvettes type "Bande large" entre des niveaux de charge de :

10 % - palier inférieur

90, 80, 70 % ... palier supérieur de la charge de rupture statique.

L'essai de traction sur éprouvette type "Bande large" a été mis au point à l'Université de Liège en 1979 et depuis adopté par la RILEM [1]. Les éprouvettes sont rectangulaires (L = 0,8 m l = 0,1 m). La vitesse de déformation est de 50 % de la déformation par minute.

Sur un matériau testé l'enchaînement des opérations adopté est le suivant :

- Détermination de la charge de rupture statique.
- Elaboration du modèle rhéologique statique.
- Calcul des niveaux de palier supérieur 90, 80, 70 % de la charge de rupture statique ; calcul du niveau inférieur fixé conventionnellement à 10 %.
- Essai de fatigue. Dans une première phase entre le palier supérieur 90 % et inférieur 10 %, si rupture, nouvel essai entre 80 % et 10 % et ainsi de suite jusqu'à vérification du critère d'endurance (cf. 2.2.)

Lors des essais en fatigue la vitesse de déplacement est réglée automatiquement de manière à suivre un signal sinusoïdal selon la fréquence définie précédemment.

2.2. Critères de résistance à la fatigue

La limite d'endurance correspond au palier supérieur de charge pour lequel 5 éprouvettes résistent à 50000 cycles ; le palier inférieur étant fixé conventionnellement à 10 % de la charge de rupture statique.

2.3. Machine de fatigue

Le dynamomètre employé est de marque TINIUS OLSEN dont la charge maximale est de 500 kN. Il est équipé d'un dispositif qui contrôle soit les déformations, soit les charges. Tous les essais ont été réalisés à charge contrôlée (signal sinusoïdal).

2.4. Matériaux testés

Les matériaux ont été sélectionnés en relation avec leur présence sur le marché des géotextiles, et leurs paramètres de constitution (polymère) et de fabrication (tissé ; nontissé, - aiguilleté - thermosoudé).

2.4.1. Tissé de bandelettes de polypropylène - masse surfacique 0,2 kg/m2 - marque SCOTLAY.

2.4.2. Nontissé aiguilleté obtenu par filature directe ; polyester ; masse surfacique 0,21 kg/m2 - marque BIDIM.

2.4.3. Nontissé aiguilleté obtenu par filature directe ; polypropylène ; masse surfacique 0,2 kg/m2 - marque SODOCA.

2.4.4. Nontissé thermosoudé obtenu par filature directe ; polypropylène ; masse surfacique 0,2 kg/m2 - marque TYPAR.

3- SIMULATION MATHEMATIQUE

Le modèle rhéologique reproduisant les déformations du géotextile en fatigue (nombre et type de cycles) dépend de son comportement sous charge statique.

On peut donc écrire la relation :

"Modèle rhéologique fatigue = Modèle rhéologique statique + Effet différé fatigue".

3.1. Modèles rhéologiques en traction statique

Nous avons observé en cours d'expérimentation deux types de comportement.

3.1.1. Déformations sans effet de fluage[2]

On représente ce type de comportement au moyen d'un modèle rhéologique comportant deux ressorts en série (Figure 1), un des deux ressorts est mis en parallèle avec une crémaillère qui autorise uniquement les allongements.

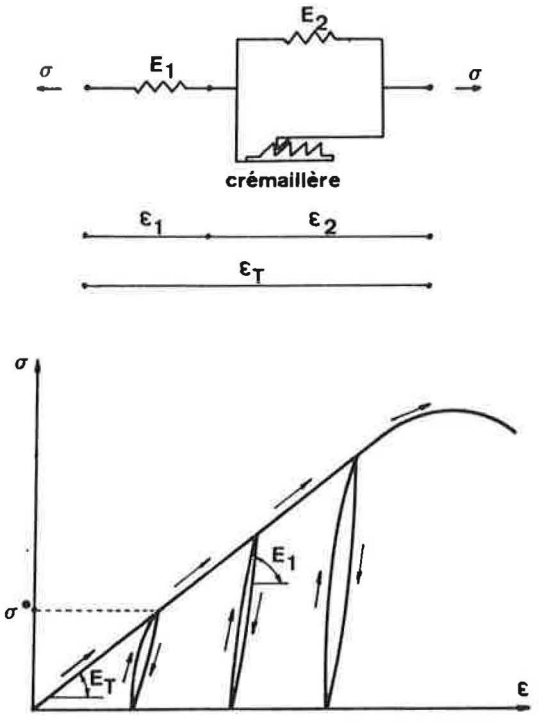

FIGURE 1 : Déformation sans effet de fluage (traction statique)

La mise en évidence de chacun des composants du modèle (Figure 1) est possible au moyen d'un essai type "Bande large" (cf. 2.1.).

Lors de la première mise en charge, les deux ressorts sont sollicités simultanément. Si pour un niveau de charge intermédiaire σ^* on opère une décharge (Figure 1) la crémaillère bloque le ressort E_2 au niveau de déformation maximum atteint sans et seul le ressort E_1 travaille.

Lors de la remise en charge du système et lorsque la contrainte σ^* est atteinte, le ressort E_2 entre de nouveau en fonctionnement. Le module résultant du système (E_T) se décomposant ainsi :

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \qquad (1)$$

Les modules E_T et E_1 sont définis expérimentalement et la relation (1) permet le calcul de E_2

$$E_2 = \frac{E_1 \times E_T}{E_1 - E_T} \qquad (2)$$

- Le ressort E_1 représente l'élasticité rémanante du géotextile en cours de déformation.
- Le système "ressort E_2 crémaillère" représente la destruction interne du matériau.

3.1.2. Déformations avec effet de fluage

Dans ce cas le modèle rhéologique est plus complexe (Figure 2) ; il consiste en la mise en série de plusieurs systèmes (1,2,3).

- Un ressort E_1
- Un ressort E_2 + crémaillère en parallèle
- Un ressort E_3 + dash pot η_3 en parallèle

Soit (Figure 2) $\varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ (3)

La déformation a lieu à vitesse constante on obtient :

$$\varepsilon_T = k \times t \qquad (4)$$

k = vitesse de déformation (m/s)

t = temps (seconde)

L'équation rhéologique donnant la valeur de σ en fonction de $\varepsilon = k \times t$ est :

$$\sigma = E_T k t - \frac{E_T^2 \times k \times \eta_3}{(E_T + E_3)^2}\left[\left(\frac{E_T + E_3}{\eta_3} t - 1\right) + e^{-\frac{E_T + E_3}{\eta_3} t}\right] \qquad (5)$$

Lorsque t tend vers zéro, la dérivée de cette fonction (Figure 3) tend vers :

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)_{t \to 0} = E_T k \qquad (7)$$

$$E_T = \frac{E_1 \times E_2}{E_1 + E_2} \qquad (6)$$

La valeur de E_T est donc définie.

Lorsqu'une décharge est amorcée, le ressort E_2 est bloqué par la crémaillère. Dans ce cas E_1, E_3, η_3 travaillent. On peut démontrer que, si σ^* est la valeur de la contrainte au moment de la décharge (Figure3)

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)_{\sigma \to \sigma^*} = E_1 k \ (\text{décharge}) \qquad (8)$$

La formule (6) permet la détermination de E_2. Pour la détermination de E_3 l'équation (5) se simplifie (disparition du terme η_3) lorsque le temps prend une valeur importante, d'où E_3. Pour déterminer η_3 on ajuste statistiquement le modèle en choisissant la plage de temps où les effets du fluage sont les plus sensibles.

- Le ressort E_1 représente l'élasticité rémanente du géotextile
- Le système "ressort E_2 + crémaillère représente la déformation irréversible donc la destruction interne du matériau
- Le système "ressort E_3 + dash pot" η_3 rend compte de l'effet de fluage. Les déformations relatives à ce système sont réversibles mais différées.

Après décharge intermédiaire (σ^*) accompagnée d'un certain temps de repos, il ne subsiste alors qu'une déformation rémanente égale à ε_2 contenue dans le système 2 (ressort + crémaillère).

3.2. Modèle rhéologique en "traction fatigue"

Nous nous proposons au travers de ce modèle, d'exprimer la valeur de l'allongement du géotextile en fonction du nombre de cycles subis (fonction du temps).

Sur la base de l'expérience acquise, nous pouvons proposer pour tous les géotextiles le modèle de la figure 2.

- Les systèmes 1 (E_1) et 2 (E_2 + crémaillère) conservent la même signification que pour la traction statique.
- Le système 3 (E_3 + η_3) représente la déformation différée sans charges répétées.

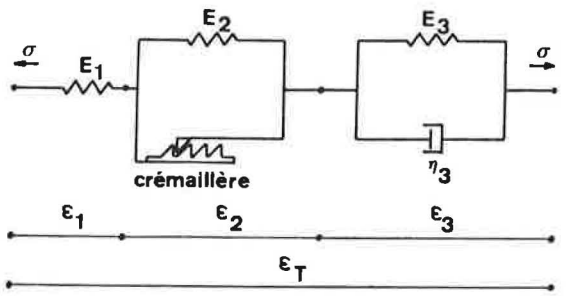

FIGURE 2 : Modèle rhéologique d'un géotextile avec effet de fluage (traction statique)

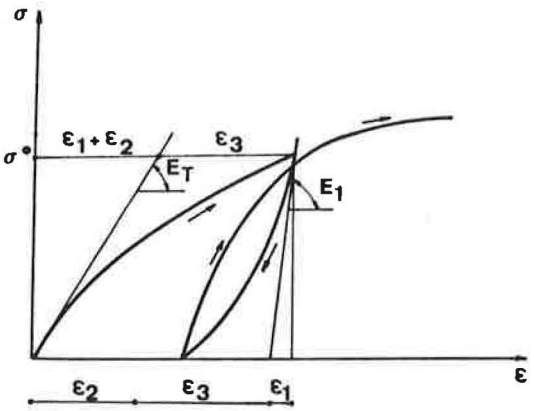

FIGURE 3 : Mise en évidence des constituants d'un modèle visco-plastique de géotextile

On constate par expérience que tous les géotextiles sont régis en "traction fatigue" par une même loi de comportement, ce qui n'est pas le cas en traction statique.

Appliquons aux bornes du modèle rhéologique Figure 2 un sollicitation :

$$\sigma = \sigma_M \times A \sin \omega t \qquad (9)$$

après calcul, on obtient la relation :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_M}{E_T} + A\left(\frac{1}{E_T} + \frac{1}{E_1}\right) + \frac{\sigma_M}{E_3}\left(1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3}t}\right) + \frac{A}{E_1}\sin \omega t + \frac{A}{E_3^2 + \omega^2 \eta_3^2}\left(E_3 \sin \omega t - \omega \eta_3 \cos \omega t + \omega \eta_3 e^{-\frac{E_3}{\eta_3}t}\right) \qquad (10)$$

où $\varepsilon(t)$ - Allongement relatif total au temps t(-)
σ_M - Contraite au niveau moyen (kN/m)
A - Amplitude de la contrainte (kN/m)
E_T - Module d'élasticité global à l'origine (kN/m)
E_1 - Module du système 1 (kN/m)
E_3 - Module de fluage (kN/m)
η_3 - Coefficient d'amortissement de fluage ($\frac{kN \times sec}{m}$)
ω - Pulsation (rad/sec)
t - Temps (sec)

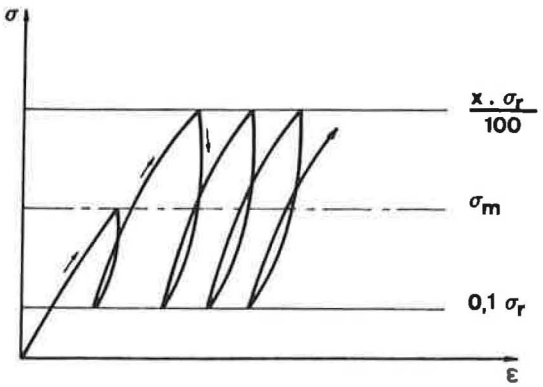

FIGURE 4 : Essais de fatigue entre x % et 10 % de la charge de rupture statique σ_R

La détermination de E_1 et E_2 s'opère comme précédemment. Pour ce qui est de E_3 et de η_3, on observe d'abord que lorsque t prend des valeurs importantes l'effet visqueux devient négligeable. De plus en calculant la déformation au niveau du chargement moyen $\sigma = \sigma_M$, $\sin \omega t = 0$. Enfin le dernier terme de la relation (10) peut être négligé devant les autres.

Il reste :

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_M}{E_T} + A\left(\frac{1}{E_T} + \frac{1}{E_1}\right) + \frac{\sigma_M}{E_3} \qquad (11)$$

Tous les termes sont connus sauf E_3, on peut après détermination de E_3 ajuster η_3 dans la relation (10) de manière à faire coincider les déformations calculées et observées au cours des premiers cycles de chargement.

4- RESULTATS OBTENUS

4.1. Essais statiques

TABLEAU 1 Essais de traction statique

GEOTEXTILES		σ_R (kN/m)	ε_R (-)	E_T (kN/m)	E_1 (kN/m)	E_2 (kN/m)	E_3 (kN/m)	η_3 (kN.sec/m)
BIDIM	SP	23,4	0,68	46,2	641	49,8	19,0	3782
	ST	18,6	0,66	31,3	486	33,5	12,3	4566
SODOCA	SP	12,4	1,55	15,6	144	17,6	0,1	2000
	ST	14,0	2,01	17,9	178	19,9	5,0	1425
TYPAR	SP	14,5	0,28	741	1101	2266	42,0	956
	ST	14,0	0,21	483	844	1128	47,5	960
SCOTLAY	SP	20,1	0,38	67,0	570	76,0	-	-
	ST	8,9	0,23	34,4	226	40,6	-	-

SP - Sens Production
ST - Sens Travers

4.2. Essais de fatigue

TABLEAU 2 Essais de traction fatigue

GEOTEXTILES		$\sigma_{end.}$ (kN/m)	$\tau_{lim.end}$ (% σ_R)	ε_{50000} (-)	E_3 (kN/m)	η_3 (kN x sec/m)	$\varepsilon_{rupt.}$ (-)
BIDIM	SP	16,4	70	0,54	62,7	65 600	0,70
	ST	13,0	70	0,69	66,6	42 800	0,69
SODOCA	SP	6,2	50	1,65	2,9	50 000	1,65
	ST	9,8	70	1,73	4,9	45 000	2,22
TYPAR	SP	10,2	70	0,66	7,8	117 000	0,55
	ST	8,4	60	0,32	12,7	142 000	0,39
SCOTLAY	SP	10	50	0,29	163,0	485 000	0,33
	ST	7,1	80	0,34	140,0	420 000	0,37

SP - Sens Production
ST - Sens Travers

Rappelons que :

la limite d'endurance est exprimée en pourcentage de la résistance à la rupture (cf. 22) en "traction statique" (Tableau 1) en tenant compte de l'orientation des efforts appliqués (SP-ST)

La contrainte d'endurance σ_{end} correspond à la contrainte de rupture σ_R par la limite d'endurance.

ε_{50000} est la déformation moyenne observée au 50000ème cycle d'un essai de fatigue "réussi" (cf.22)

E_3 et η_3 correspondent au cas de l'essai de fatigue.

E_1 et E_2 du modèle rhéologique en fatigue correspondent aux E_1, E_2 obtenus au moyen d'essai statique (Tableau 1).

$\varepsilon_{rupt.}$ est relative aux allongements correspondant à la rupture en fatigue dans le cas où l'on se trouve au-delà de la limite d'endurance.

4.3. Commentaires sur les résultats obtenus

Nous n'aborderons pas dans ce paragraphe, une quelconque comparaison entre les divers matériaux testés, mais uniquement une analyse de leur comportement en soulignant les paramètres qui nous semblent les plus importants, et qui jouent un rôle primordial dans la connaissance des phénomènes de fatigue. Une interprétation plus détaillée fera l'objet d'une prochaine publication.

4.3.1. Traction statique

La connaissance des valeurs E_1 et E_2 obtenues par des essais en traction statique est nécessaire pour aborder le modèle rhéologique en fatigue.

Nous avons observé que la plupart des matériaux testés répondent à un modèle avec effet de fluage (Figure 2) mis à part pour le SCOTLAY où E_3 et η_3 ne sont pas définis.

A l'exception du TYPAR, on remarque que le module E_T est très différent de E_1. Cette constatation peut être visualisée sur les figures 5-6-7 et 8.

E_T est évalué sur la base de l'allongement $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ alors que E_1 l'est sur la base de ε_1

Pour tous les matériaux, sauf pour TYPAR ε_2 est très différent de ε_1 et par conséquent des modules E_T et E_1 très différents.

Le module E_2 est en relation à l'aptitude du géotextile à encaisser une "destruction interne irrécupérable". Si E_2 augmente la destruction interne diminue. On mettra en rapport les valeurs des déformations rémanentes ε_2 aux figures 5,6,7 et 8 et les valeurs des modules E_1 au Tableau 1.

Il est à remarquer que le point de contact de l'hystérésis avec l'axe des déformations ε (Fig. 5,6, 7,8) ne correspond pas à la restitution intégrale de l'effet visqueux emmaganisé dans le géotextile.

Le cycle déterminé expérimentalement est réalisé à une

vitesse de déformation constante de 0,05 m par minute, ce qui est trop rapide pour espérer une restitution instantanée et complète de la déformation en fluage.

Le module E_3 associé avec le dash-pot η_3 témoigne d'un effet de fluage plus ou moins marqué. Le dash-pot η_3 est un frein aux déformations du géotextile. Si η_3 est important (Figure 5 et 6), on se rapproche d'un comportement élastique (Figure 1). Le tissé (Figure 8) SCOTLAY peut être considéré comme élastique jusqu'aux valeurs proches de sa rupture.

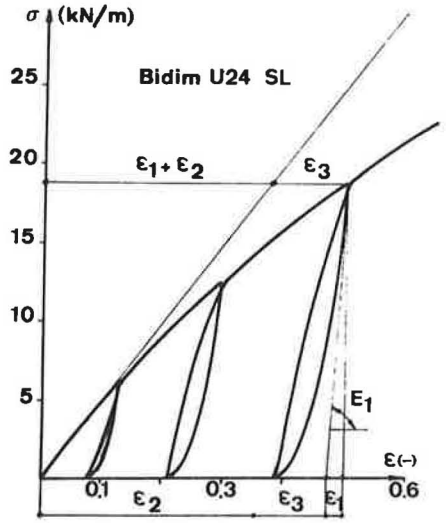

FIGURE 5 : Nontissé aiguilleté polyester

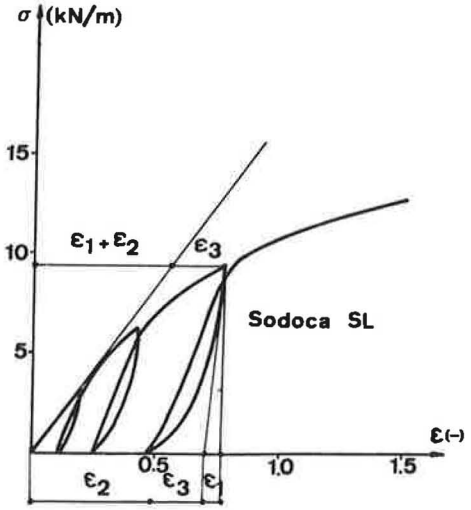

FIGURE 6 : Nontissé aiguilleté polypropylène

4.3.2. Traction fatigue

La limite d'endurance dépend de l'orientation de l'effort appliqué. Pour des paliers supérieurs plus importants que la limite d'endurance, on constate des ruptures d'éprouvettes après un nombre de cycles très variable (rapport de 1 à 50). Pour BIDIM, SODOCA, SCOTLAY, la rupture se produit pour des valeurs d'allongement voisines de celles obtenues au cours d'essai statique. Il semble donc que pour ces matériaux l'allongement peut être considéré comme une caractéristique intrinsèque. Pour TYPAR le comportement en fatigue est différent et l'observation précédente est mise en défaut ; on assiste vraisemblablement à un phénomène de redistribution interne des contraintes.

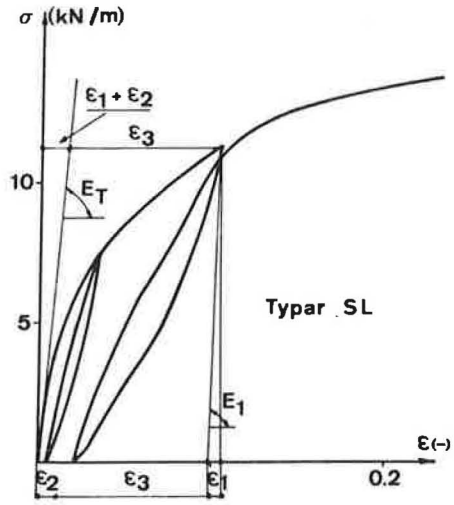

FIGURE 7 : Nontissé thermosoudé polypropylène

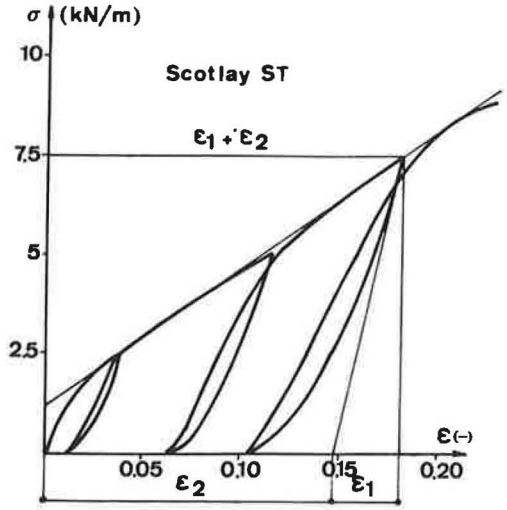

FIGURE 8 : Tissé bandelette polypropylène

Les valeurs de E_1, E_2, E_3 et η_3 permettent de prédire en deçà de la limite d'endurance les déformations du géotextile en fonction du nombre de cycles subis.

Les modules E_1 et E_2 ont été définis au cours d'essais en traction statique. Dans le cas de la fatigue, le module E_3 fixe le niveau des déformations en fin d'essai réussi (ε_{50000}). On observe que E_3 est d'autant plus grand que ε_{50000} est faible. E_3 dépend également de E_1 et E_2

Le dash pot η_3 marque la progressivité des déformations vers la valeur ε_{50000}. Si η_3 est faible $\varepsilon(t)$ atteint rapidement ε_{50000}

6- CONCLUSIONS

A ce stade des travaux conduits à l'université de Liège, les auteurs peuvent conclure de l'existence d'une limite d'endurance des géotextiles en fatigue traction.

Au moyen des formules mathématiques proposées, une évaluation des déformations des géotextiles sollicités en "traction fatigue" est devenue possible. La rupture par fatigue survient par le dépassement d'un allongement limite caractéristique du matériau. On peut donc évaluer un coefficient de sécurité.

Les modèles rhéologiques proposés montrent que les géotextiles sous fatigue sont régis par une même loi de comportement, ce qui n'est pas le cas en traction statique.

Les auteurs proposent dans cette étude une première approche du problème, mais de nombreuses questions restent posées :
fréquence, niveau inférieur du palier de charge, correlation avec la texture du géotextile ...

L'exploitation pratique des résultats de cette étude permet d'entrevoir une approche sérieuse du calcul de dimensionnement des géotextiles dans les voies de circulation. Pour cela des essais de simulation s'imposent en laboratoire. Une première tentative a déjà été réalisée dans ce sens.[3]

REFERENCES

[1] - RIGO JM - PERFETTI J
Nouvelle approche de la mesure de la résistance à la traction des géotextiles nontissés.
Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées - N° 107 - Mai Juin 1980

[2] - RIGO JM - PERFETTI J
Mécanisme de ruine des géotextiles nontissés soumis à la traction.
Revue des matériaux et construction - Vol 14 - pp. 289-294

[3] - GOURC JP - PERFETTI J
PERRIER H - RIGO JM
Changement cyclique d'un sol bicouche renforcé par géotextile.
Application aux chaussées provisoires.
Congrès international des géotextiles
Session 4 B - Août 1982 Las Vegas